

Postolje za ispitivanje dodirnog pritiska između transformatorskih limova

Pavić, Petar

Master's thesis / Diplomski rad

2020

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:121894>

Rights / Prava: [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2024-07-14**

Repository / Repozitorij:

[Repository of Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Petar Pavić

Zagreb, 2020.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Mentori:

Prof. dr. sc. Krešimir Vučković, dipl. ing.

Student:

Petar Pavić

Zagreb, 2020.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći znanja stečena tijekom studija i navedenu literaturu.

Iskreno se zahvaljujem svom mentoru dr. sc. Krešimiru Vučkoviću, dipl. ing. na svom dosadašnjem uloženom trudu, vremenu i povjerenju, autoritetu i prijateljstvu te ukazivanju na nedostacima u radu tijekom njegovog nastajanja.

Zahvaljujem se i g. Pavlu Barišiću iz tvrtke Končar Energetski transformatori d.o.o. na korisnim savjetima kao i na nesebičnoj pomoći i asistenciji prilikom same izrade ovog rada.

Također, zahvaljujem se svojoj obitelji na bezrezervnoj podršci i žrtvi tokom cijelog vremena trajanja studija.

Posebnu zahvalu izražavam svojoj voljenoj Patricii koja je uvijek i bez iznimke bila uz mene, a najviše kada je bilo najteže.

Petar Pavić



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomске ispite
 Povjerenstvo za diplomске ispite studija strojarstva za smjerove:
 procesno-energetski, konstrukcijski, brodogradnja i inženjersko modeliranje i računalne simulacije

Sveučilište u Zagrebu	
Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa	
Ur. broj	

DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **Petar Pavić** Mat. br.: 0035192345

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Postolje za ispitivanje dodirnog pritiska između transformatorskih limova**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Test stand for determination of contact pressure distribution between transformer sheets**

Opis zadatka:

Jezgra transformatora izvedena je slaganjem paketa čeličnih limova debljine od 0,23 mm do 0,3 mm s preklapom. Izvedbe kao i načini slaganja paketa limova su brojni. Ono što ih povezuje je minimalni pritisak od 0,15 MPa koji je potrebno ostvariti između limova kako bi se magnetski tok između stupova i jarna odvijao bez dodatnog otpora. Pritisak na limove, pored navedenog, smanjuje buku u radu te povećava dugotrajnost i stupanj djelovanja transformatora.

U radu je potrebno koncipirati i konstrukcijski razraditi postolje za ispitivanje dodirnog pritiska između transformatorskih limova uzimajući pri tom u obzir različite debljine paketa limova. Pretpostaviti da se pritisak između limova ostvaruje pritezanjem vijaka.

Vrijednosti potrebne za proračun i odabir pojedinih komponenti usvojiti iz postojećih rješenja sličnih uređaja, iskustvenih vrijednosti te u dogovoru s mentorom. Kompletno konstrukcijsko rješenje razraditi do razine radioničkih crteža. U radu navesti korištenu literaturu, norme i eventualnu pomoć.

Zadatak zadan:
14. studenoga 2019.

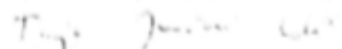
Datum predaje rada:
16. siječnja 2020.

Predviđeni datum obrane:
20. 24.1.2020.

Zadatak zdao:


Izv. prof. dr. sc. Krešimir Vučković

Predsjednica Povjerenstva:


Prof. dr. sc. Tanja Jurčević Lulić

SADRŽAJ

1. UVOD.....	1
2. STEZNI SUSTAV JEZGRE TRANSFORMATORA	2
3. TEORIJA KONTAKTA LAMINIRANIH JEZGRI	8
4. ANALIZA POSTOJEĆIH RJEŠENJA I EKSPERIMENATA.....	12
5. ANALIZA METODA ZA MJERENJE RASPODJELE KONTAKTNOG TLAKA	20
6. ULTRAZVUČNA METODA ZA MJERENJE SILE U VIJKU	26
7. KONCEPTUALNA RAZRADA.....	32
8. ANALIZA ODABRANOG KONCEPTA.....	41
9. ZAKLJUČAK.....	46

POPIS SLIKA

Slika 1. Stezni sustav jezgre transformatora	1
Slika 2. Stezni sustav jezgre transformatora	2
Slika 3. Jezgrasti i ogrnuti tip transformatora	3
Slika 4. Deformacija pravokutnog svitka	4
Slika 5. Optimalni presjek stupa jezgre	5
Slika 6. Presjek stupa stegnut tlačnim pločama	6
Slika 3. Profil neravnina	9
Slika 4. Hidraulička preša	12
Slika 5. Ovisnost aksijalnog pomaka o opterećenju	13
Slika 4. Usporedba eksperimenata s grafitnim prahom i bez njega	14
Slika 7. Utjecaj konfiguracije vijaka na raspodjelu tlaka	15
Slika 8. Utjecaj momenta pritezanja vijaka na raspodjelu tlaka	16
Slika 9. Način pozicioniranja <i>Fujifilm Prescale</i> papira	17
Slika 10. Utjecaj debljine stezne ploče na raspodjelu tlaka	17
Slika 11. Rezultati numerički ostvarene raspodjele tlaka	18
Slika 12. Rezultati eksperimentalno ostvarene raspodjele tlaka	18
Slika 13. Pozicija matričnog senzora	19
Slika 14. Redosljed pritezanja vijaka i rezultati raspodjele tlaka	19
Slika 15. Mjerni pretvornik sile	20
Slika 16. Podjela kontaktnog područja na četiri zone	21
Slika 17. Shematski prikaz indikatorskog papira	22
Slika 18. Matrični senzor	23
Slika 19. Mjerni sustav koji koristi matrični senzor	24
Slika 20. Ovisnost otpora senzora o opterećenju	24
Slika 21. Mjerenje sile u vijku s pomoću ultrazvuka	26
Slika 22. Utjecaj hrapavosti površine na ultrazvučni signal	29
Slika 23. Utjecaj odstupanja od okomitosti na ultrazvučni signal	29
Slika 24. Utjecaj udubljenja na glavi vijka na ultrazvučni signal	29
Slika 25. Utjecaj udubljenja s povišenim rubom na ultrazvučni signal	30
Slika 26. Utjecaj hrapavosti reflektirajuće strane vijka na ultrazvučni signal	30
Slika 27. Utjecaj odstupanja od okomitosti reflektirajuće strane vijka na ultrazvučni signal	30
Slika 28. Utjecaj odstupanja od paralelnosti na ultrazvučni signal	31
Slika 29. Funkcijska struktura	32
Slika 30. Prvi koncept	36
Slika 31. Drugi koncept	37
Slika 32. Treći koncept	38
Slika 33. Četvrti koncept	39
Slika 34. Peti koncept	39
Slika 35. Šesti koncept	40
Slika 36. Odabrani razrađeni koncept	41
Slika 37. Prostorni prikaz razrađenog koncepta	42
Slika 38. Prostorni prikaz razrađenog koncepta	42
Slika 39. Prostorni prikaz steznika	43
Slika 39. Prostorni prikaz elemenata za stezanje pomoću steznih traka	44
Slika 41. Prostorni prikaz elemenata za stezanje pomoću steznih prečki	45

POPIS TABLICA

Tablica 1. Svojstva transformatorskih limova.....	11
Tablica 2. Morfološka matrica	33

POPIS TEHNIČKE DOKUMENTACIJE

2020/21-000	POSTOLJE ZA ISPITIVANJE KONTAKTNOG TLAKA
2020/21-001	ISPITNI PROFIL JEZGRE
2020/21-002	STEZNA PREČKA
2020/21-003	HORIZONTALNA IZOLACIJSKA PODLOGA
2020/21-004	PROFILNA VODILICA
2020/21-005	STEZNIK
2020/21-006	PRIKLJUČNI ELEMENT STEZNE TRAKE
2020/21-007	VODILICA STEZNE TRAKE
2020/21-008	NATEZAČ STEZNE TRAKE
2020/21-009	SVORNI VIJAK
2020/21-010	POTPORNA KONSTRUKCIJA

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
A	mm^2	Stvarno područje kontakta
A_x	mm^2	Područje kontakta na osi X
a	mm^2	Infinitezimalno područje kontakta nakon deformacije
F	N	Tlačna sila
h	mm	Iznos skraćivanja vrha neravnina
n	-	Ukupan broj vrhova površinskih neravnina
p	N/mm^2	Srednji tlak na površini lima
p_m	N/mm^2	Srednji tlak tečenja površinskih neravnina
σ	-	Standardna devijacija
θ	°	Vršni kut površinskih neravnina

SAŽETAK

Rad se bavi razradom konstrukcijskog rješenja ispitnog postolja za ispitivanje raspodjele kontaktnog tlaka među limovima transformatorske jezgre. U uvodnom djelu opisana je motivacija za bavljenjem navedenom tematikom. U drugom poglavlju je napravljen kratki pregled osnovnih dijelova steznog sustava energetskog transformatora. U trećem poglavlju opisana su mehanička svojstva transformatorskih limova dobivena statičkim tlačnim pokusom te je predstavljen analitički izvod za raspodjelu kontaktnog tlaka. U četvrtom poglavlju je napravljena analiza postojećih eksperimenata s ciljem proučavanja mogućih konstrukcijskih rješenja ispitnog postolja. U petom poglavlju analizirane su tri potencijalne metode za mjerenje raspodjele kontaktnog tlaka uz navođenje njihovih prednosti i nedostataka. Kako bi se osigurala ponovljivost mjerenja, potrebno je osigurati da se u sustav pri svakom ispitivanju unosi jednak iznos sile. Iz tog razloga je u šestom poglavlju napravljen pregled jedne od najpouzdanijih metoda za određivanje sile u vijku, tj. metode koja koristi ultrazvučni mjerač. U sedmom poglavlju, na temelju funkcijske strukture i morfološke matrice, generirano je nekoliko različitih koncepata ispitnog postolja i provedeno je vrednovanje svakog od njih. U osmom poglavlju je odabrano najbolje i najrealnije rješenje za detaljnu razradu. Razrađeno je konstrukcijsko rješenje koje je dimenzionirano prema određenim dijelovima koji se standardno koriste za stezanje transformatorske jezgre u tvrtki Končar Energetski Transformatori d.o.o. Najvažniji parametar razrade ispitnog postolja bila je sposobnost ispitnog postolja da ispita sve moguće standardno korištene stezne elemente. Na kraju, u devetom poglavlju, prikazan je kratak osvrt na proces konstruiranja ispitnog postolja i predviđeni su budući koraci koji se nadovezuju na ovaj rad.

Ključne riječi: kontaktni tlak, ispitno postolje, indikatorski papir, matrični senzor, sila u vijku

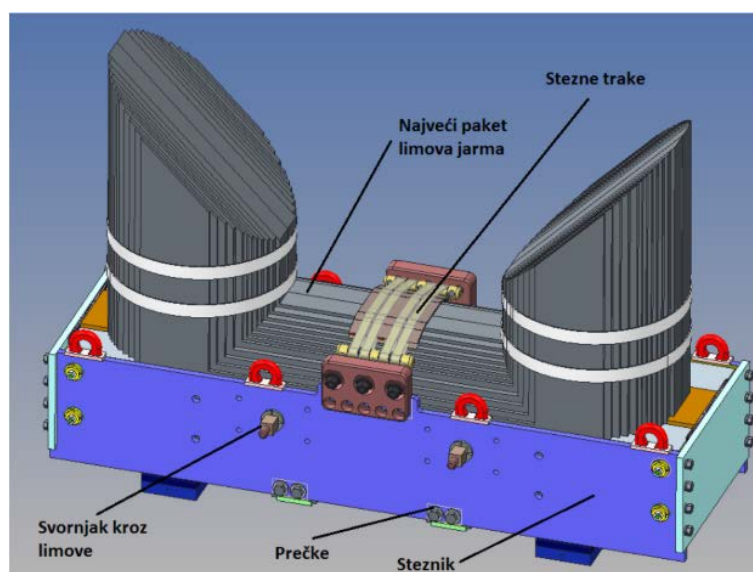
SUMMARY

The thesis deals with the test rig design for contact pressure distribution testing between the transformer core sheets. The introductory part describes the motivation for dealing with this topic. In the second chapter, a brief overview of the basic parts of the power transformer clamping system is given. Chapter three describes the mechanical properties of transformer sheets obtained during static compression test and also presents an analytical expression for the contact pressure distribution. In Chapter 4, an analysis of existing experiments is made in order to study the possible design concepts of the test rig. In Chapter Five, three potential methods for contact pressure distribution measuring are analyzed, listing their advantages and disadvantages. In order to ensure repeatability of measurements, it's necessary to ensure that an equal amount of force is introduced into the system at each test. For this reason, Chapter 6 gives an overview of one of the most reliable methods for determining the bolt force, that is, the method that uses an ultrasonic meter. In the seventh chapter, based on the functional structure and morphological matrix, several different test rig concepts were generated and an evaluation of each was conducted. In Chapter 8, the best and most realistic solution for detailed elaboration is selected. A design solution that's dimensioned according to standard parts used for the transformer core clamping in Končar Power Transformers Ltd. has been developed. The most important parameter of test rig design was the ability to test all possible clamping elements. Finally, Chapter 9 presents a brief overview of the test bed construction process and outlines future steps that build on this work.

Key words: contact pressure, test rig, indicator paper, matrix sensor, bolt force

1. UVOD

Jezgra transformatora izvedena je slaganjem horizontalnih i vertikalnih paketa čeličnih limova debljine od 0,23 mm do 0,3 mm. Kako bi se osigurao prijenos magnetskog toka između stupova i jarma bez dodatnog otpora, koji je posljedica zračnosti među limovima, potrebno je osigurati projektni kontaktni tlak na najširem paketu jarma u iznosu od 0,15 MPa. Željeni kontaktni tlak ostvaruje se steznim sustavom koji je prikazan na slici 1, a detaljnije opisan u poglavlju 2.



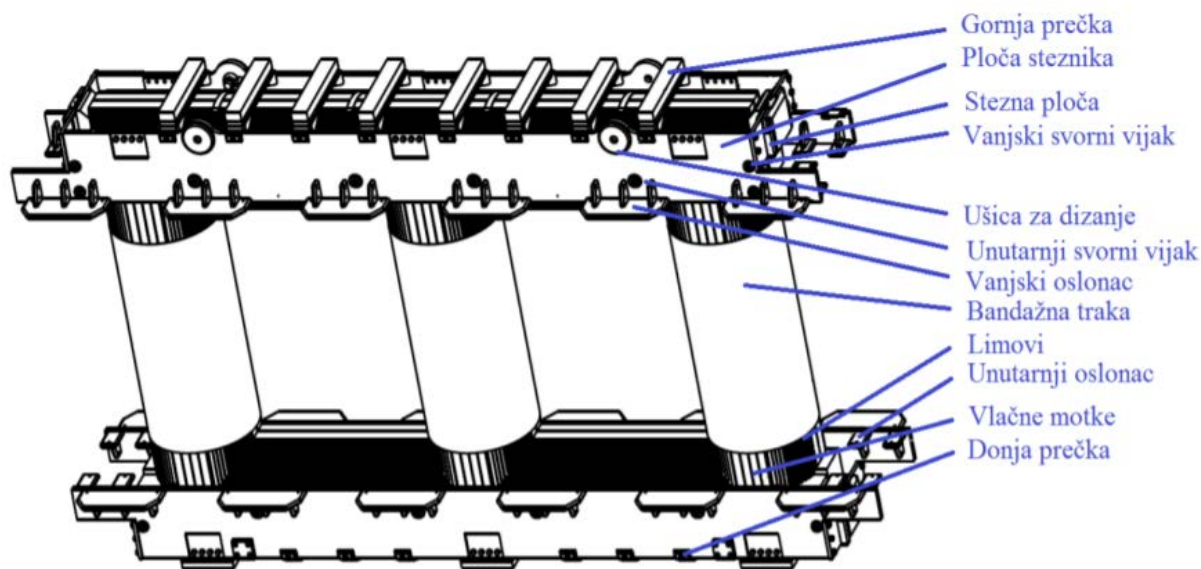
Slika 1. Stezni sustav jezgre transformatora [1]

Kao posljedica lokalnog unosa sile pritezanja na pozicijama steznih elemenata, udaljavanjem od steznog elementa neminovno se javlja pad kontaktnog tlaka među limovima. Ova pojava najizraženija je na središnjem paketu lima zbog najveće površine na koju djeluje sila pritezanja.

Budući da je eksperimentalno mjerenje kontaktnog tlaka, čak i u današnje vrijeme, poprilično zahtjevan zadatak, mjerenje je najprije potrebno provesti na za to posebno koncipiranom i konstruiranom ispitnom postolju koje će biti značajno manjih dimenzija u odnosu na stvarni model transformatorske jezgre. Pokažu li se mjerenja na ispitnom postolju pouzdanima, metodologija rada i mjerni uređaji mogu se u budućnosti primijeniti i na stvarnom modelu transformatorske jezgre.

2. STEZNI SUSTAV JEZGRE TRANSFORMATORA

U ovom poglavlju detaljnije su prikazani osnovni dijelovi steznog sustava jezgre transformatora i ukratko je opisana uloga pojedinih dijelova unutar steznog sustava. Sam stezni sustav prikazan je na slici 2.



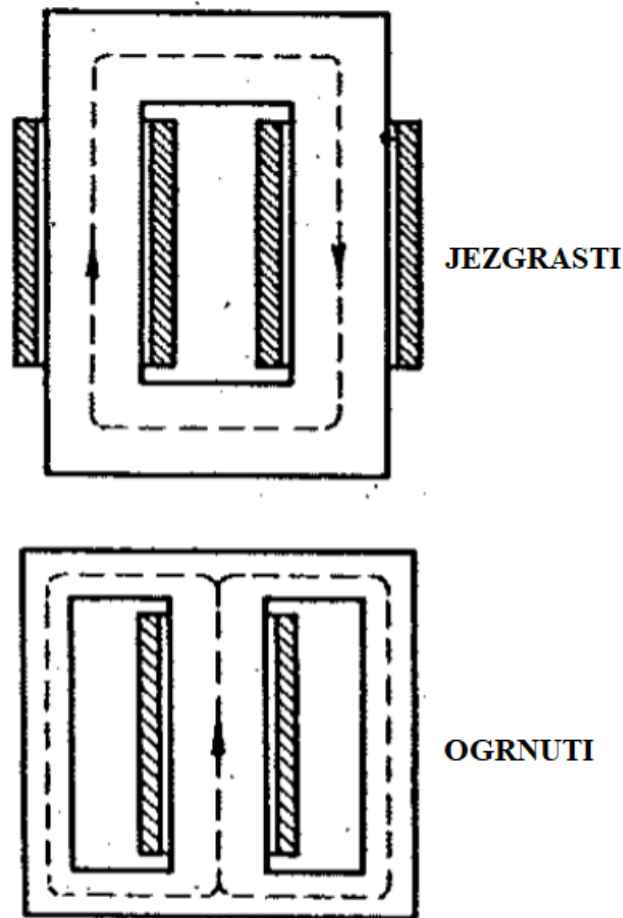
Slika 2. Stezni sustav jezgre transformatora [2]

Po završetku slaganja paketa limova na za to posebno konstruiranoj napravi isti se tlače pločama steznika s obje strane. Sila tlačenja ostvaruje se pritezanjem vanjskih i unutarnjih svornih vijaka koji su uobičajeno izrađeni od čelika, a u novije vrijeme primjenjuju se i vijci izrađeni od kompozita. U slučaju da kupac to traži, stezanje se vrši i pomoću kompozitnih steznih traka. S gornje i donje strane jezgra se tlači i posebnim mehanizmom steznih prečki. I na kraju, kako bi se osigurala torzijska krutost, dodaju se stezne ploče koje povezuju prednju i stražnju ploču steznika. Sila koja se javlja prilikom podizanja transformatora prenosi se na gornji steznik preko ušica izrađenih posebno za tu namjenu, a s gornjeg na donji steznik preko vlačnih motki.

2.1. Oblik jezgre

Jezgra transformatora sastoji se iz stupova koji nose namote i iz jarmova koji pokazuju stupove. Otvor između jarmova i stupova naziva se prozor jezgre, a služi za smještaj namota. Veličinu prozora određuju dimenzije namotaja koji zauzimaju presjek prozora. Na slici 3

prikazana su dva tipa transformatora koji se razlikuju prema konstrukcijskoj izvedbi jezgre: jezgrasti i ogrnuti.



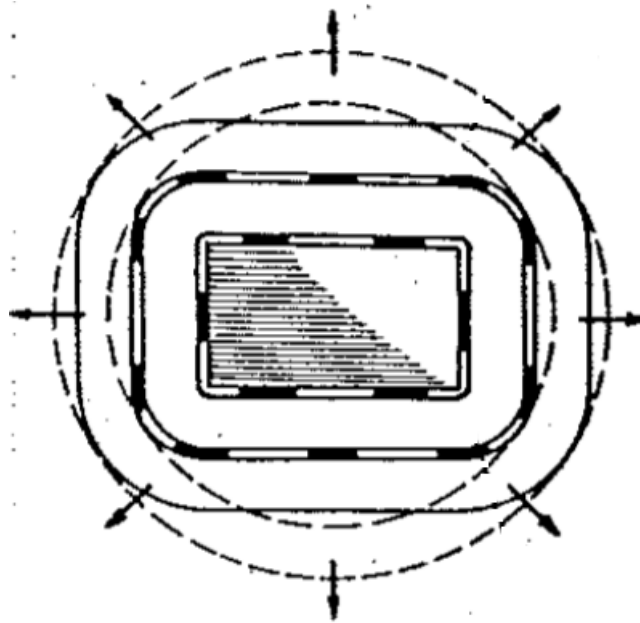
Slika 3. Jezgrasti i ogrnuti tip transformatora [3]

2.1.1. Presjek stupa i konstrukcija jezgre

Stup je obuhvaćen namotom. Veći faktor punjenja stupa osigurava manju srednju duljinu zavoja, odnosno manju potrošnju bakra. Zato se presjek prostora kojeg obuhvaća namot mora što bolje ispuniti željeznim paketom stupa i time faktor punjenja učiniti što većim.

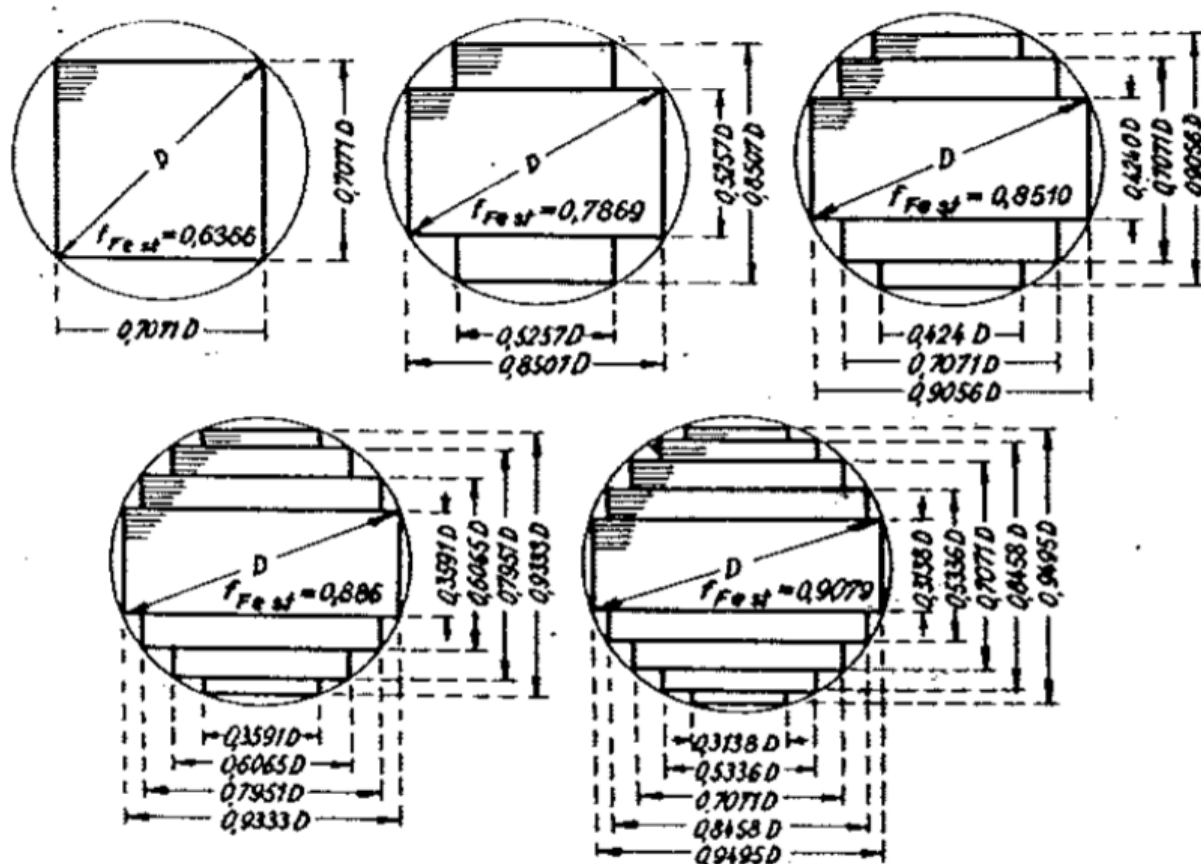
Tehnološki je najjednostavnije napraviti stup s pravokutnim presjekom jer je u tom slučaju širina svih limova jednaka. Smještanjem namota pravokutnog oblika na takav stup dobio bi se visok faktor punjenja i time bolja iskorištenost materijala. Međutim, ovakva izvedba rijetko se može primijeniti. Kod manjih transformatora koji se proizvode u velikim serijama vodiči su malog presjeka te se namotavanje se izrazito velikom brzinom što uzrokuje otežano namatanje namota pravokutnog oblika zbog nejednolike brzine vodiča uzrokovane

stalnom promjenom promjera svitka pri vrtnji nosioca svitka pravokutnog oblika. Pritom je vodič stalno izložen trzajima koji ga mogu oštetiti ili prekinuti. Kako bi se spriječila ta pojava, svitak se namata u obliku valjka, iako se pritom smanjuje faktor punjenja. Kod većih transformatora prepreku pravokutnom obliku jezgre stvaraju dinamičke sile koje kod uobičajenih cilindričnih namota djeluju radijalno što bi dovelo do neprihvatljivih deformacija pravokutnog oblika svitka prikazanih na slici 4.



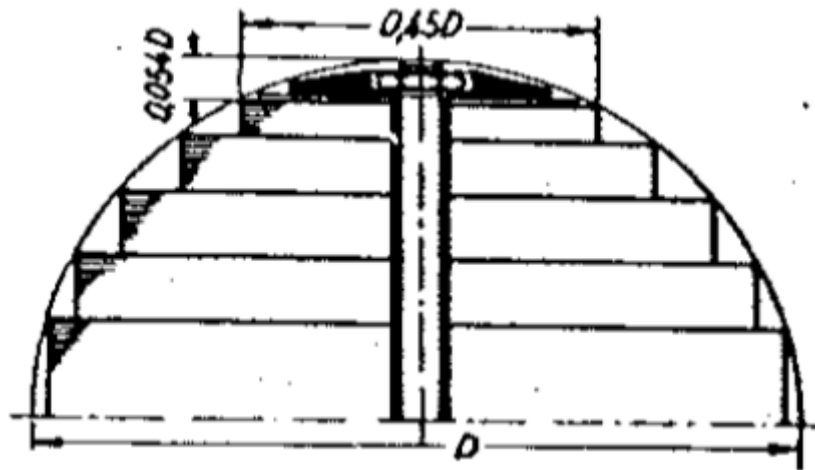
Slika 4. Deformacija pravokutnog svitka [3]

Pravokutni oblik jezgre kod velikih transformatora dolazi u obzir samo pri upotrebi plosnatih namota kod kojih dinamičke sile kratkog spoja djeluju paralelno osi namota, tj. stupa. Upotrebom kvadratnog presjeka stupa kod okruglog namota gubi se 37% raspoloživog prostora za stup što rezultira izrazito niskom faktorom punjenja. Iz tog razloga kvadratni presjek stupa primjenjiv je samo za najmanje transformatore jer se kod njih ne isplati graditi jezgru iz limova različitih širina. Porastom veličine transformatora nužno je postići i veći faktor punjenja. Optimalno rješenje prilagođavanja oblika presjeka stupa obliku kruga s do pet različitih širina limova prikazano je na slici 5.



Slika 5. Optimalni presjek stupa jezgre [3]

Najveći faktor punjenja postiže se rezanjem svakog idućeg lima na toliko veću širinu da se pri slaganju limova dobije kružni presjek stupa. Prethodno se postiže na škarama s automatskom promjenom širine svakog idućeg lima. Jezgra transformatora nakon slaganja i stezanja mora predstavljati potpuno čvrsto tijelo. Sila stezanja po jedinici površine mora teoretski biti proporcionalna debljini lima, a u praktičnoj primjeni ide se s dodirnim pritisku u iznosu do 1 N/mm^2 . Kod malih transformatora dodirni pritisci su maleni pa je dovoljno, nakon stezanja odgovarajućim spravama, stupove bandažirati vrpcom. Za transformatore snaga iznad 100 kVA upotrebljavaju se uglavnom vijci s većim podložnim pločicama, a za transformatore vrlo velikih snaga dodaju se tlačne ploče kako je prikazano na slici 6. U posljednjem slučaju širina najužeg paketa ne bi trebala biti manja od $0,45D$ što treba uzeti u obzir prilikom slaganja limova. Uvjeti pri stezanju jarmova su povoljniji jer se ne mora previše štedjeti na prostoru kao u slučaju stupova. Kod transformatora malih snaga uobičajeno se upotrebljavaju pravokutni profili od drva koji se najprije moraju isušiti kako bi iz njih izašla sva kiselina koja bi mogla sniziti probojnu čvrstoću ulja. Kod većih transformatora upotrebljavaju se čelični profili, a kod najvećih prelazi se na zavarene izvedbe.



Slika 6. Presjek stupa stegnut tlačnim pločama [3]

2.2. Ploče steznika

Ploče steznika izrađene su od konstrukcijskog čelika S235JR ili S355J2. Osim za tlačenje limova i namota služe i za transport i podizanje transformatora uz pomoć ušica koje se nalaze na njima.

2.3. Limovi jezgre

Izrađeni su od legiranog transformatorskog čelika, a debljina im je reda veličine 0,3 mm. Postoji hladno valjana i toplo valjana izvedba transformatorskog lima, a češće je u upotrebi hladno valjana zbog određenih dobrih svojstava. Limovi jezgre međusobno su izolirani, a kao izolacija se koristi lak, svileni papir ili vodeno staklo.

2.4. Svorni vijci

Svorni vijci proračunavaju se analitički na temelju željene vrijednosti kontaktnog tlaka na srednjem paketu lima. Ukupna potrebna sila za ostvarivanje željenog kontaktnog tlaka (0,15 MPa) izračunava se na temelju dimenzija limova jarma. Zatim se ta sila podijeli sa brojem vijaka te se na taj način dobiva sila koju je potrebno ostvariti u svakom od svornih vijaka. Ukoliko se koriste čelični vijci, potreban moment pritezanja za ostvarivanje tražene uzdužne sile određuje se na temelju poznatih relacija iz literature. Prolazne rupe u jezgri koje služe za prolaz i smještanje svornih vijaka stvaraju nemale probleme. Vijci moraju s velikim faktorom sigurnosti biti izolirani od željeznog paketa kako ne bi došlo do kratkog spoja između limova i kako bi se prekinuo električni krug oko magnetskog toka jer bi u suprotnom došlo do zagrijavanja pa čak i topljenja željeznog paketa na mjestima učvršćenja. Osim toga

prolazne rupe smanjuju i aktivnu površinu jezgre i time povećavaju indukciju. Nadalje, probijanjem rupa u limu povećavaju se gubici radi srha te stvorenih unutarnjih naprezanja na mjestu rezanja. Kako bi se izbjegao negativan utjecaj prolaznih rupa u limovima pokušava se učvršćenje jezgre izvesti međusobnim spajanjem limova ljepilom iz umjetnih smola (araldit), što bi trebalo jezgri dati čvrsti oblik i zamijeniti sve druge načine stezanja

2.5. Stezne prečke

Stezne prečke služe za dodatno stezanje limova jezgre u svrhu postizanja željenog kontaktnog tlaka. Svaka stezna prečka pričvršćuje se s 4 vijka (po dva sa svake strane). Uobičajeno se izrađuju na način da su nešto kraće od nominalne širine razmaka između ploča steznika.

2.6. Vlačne motke

Vlačne motke izrađuju se od visokokvalitetnog čelika, a osnovna zadaća im je povezivanje gornjih i donjih ploča steznika i prenošenje sile od dizanja transformatora. Postavljaju se na vanjsku stranu posljednjeg paketa limova na svakom stupu.

3. TEORIJA KONTAKTA LAMINIRANIH JEZGRI

Jedna od glavnih komponenti energetskog transformatora je laminirana jezgra izrađena od tankog čeličnog lima. Postoje dva međusobno povezana mehanička problema koji se javljaju prilikom konstrukcije i izrade takve jezgre. Prvi problem je određivanje minimalnog tlaka potrebnog za osiguravanje kompaktnosti jezgre, a drugi dimenzioniranje steznog sustava koji bi osigurao održavanje te kompaktnosti čak i prilikom rada transformatora. Svaka labavost koja nastane uslijed nedovoljnog početnog kontaktnog tlaka može rezultirati pojavom vibracija i buke. S druge strane, svako dodatno povećanje kontaktnog tlaka iznad potrebnog za osiguranje kompaktnosti jezgre rezultira neopravdanim povećanjem troškova izrade steznog sustava, a u krajnjem slučaju može dovesti i do oštećenja izolacije limova. Kako konstruktori transformatora prilikom konstruiranja steznog sustava ne bi bili osuđeni samo na empirijske izraze i vlastito iskustvo, u poglavlju 3.1. predstavljen je analitički izraz za raspodjelu kontaktnog tlaka među limovima, a u poglavlju 4.1.1. eksperiment koji opisuje ponašanje laminirane jezgre podvrgnute statičkom tlačnom pokusu.

3.1. Analitički izraz za raspodjelu kontaktnog tlaka među limovima

Eksperimentalno je potvrđeno od strane brojnih istraživača da je stvarno područje kontakta dviju ravnih površina linearna funkcija tlačnog opterećenja na tim površinama. Kako bi bila moguća provedba analitičke formulacije ovisnosti kontaktnog tlaka o deformaciji paketa limova, potrebno je uvesti dvije pretpostavke. Prva pretpostavka je da je jedna od površina u kontaktu savršeno kruta i glatka, a druga je da su sve neravnine zapravo stošci s jednakim vršnim kutom. Nakon što su uvedene te dvije pretpostavke, stvarno područje kontakta određeno je izrazom:

$$A = \frac{F}{p_m}, \quad (1)$$

gdje je:

A – stvarno područje kontakta.

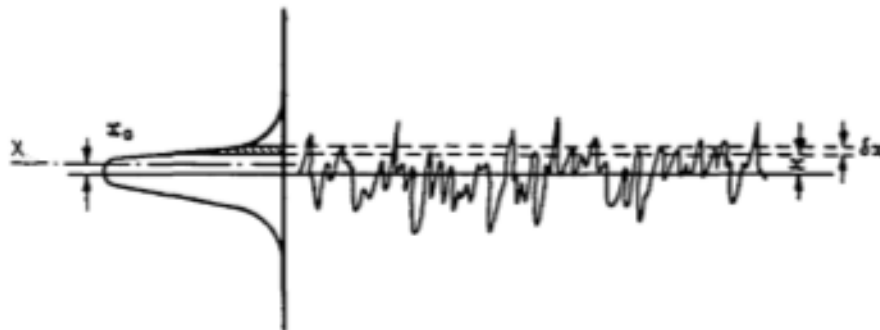
F – tlačna sila, a

p_m – srednji tlak tečenja površinskih neravnina.

Povećanjem opterećenja dolazi do deformacije postojećih vrhova neravnina i nastaju novi vrhovi, sve dok cijelo područje kontakta ne zadovolji jednadžbu (1).

Koristeći ranije navedeno kao osnovu, daljnji izvod nastoji povezati vertikalni pomak s područjem kontakta, a posljedično i s primijenjenim opterećenjem.

Uzimajući u obzir pretpostavku da su vrhovi neravnina stošci te ako polovicu vršnog kuta označimo s θ , tada će skraćenje bilo kojeg vrha neravnina za iznos h rezultirati stvaranjem područja kontakta u približnom iznosu od $\frac{\pi h^2}{\tan^2 \theta}$. Izgled površinskih neravnina podliježe zakonu normalne distribucije. Zamislimo sada stlačivanje hrapave površine do razine osi X prikazane na slici 7.



Slika 7. Profil neravnina [4]

U tom slučaju dolazi do deformacije svih vrhova iznad osi X, u iznosu koji ovisi o početnoj visini pojedinog vrha. Bitno je još jednom naglasiti da to proizlazi iz činjenice da je jedna od površina u kontaktu promatrana kao savršeno kruta i glatka. Nakon deformacije dolazi do pojave novih vrhova u infinitezimalno malom području, čija je površina određena izrazom:

$$a = \frac{\pi(x - x_0)^2}{\tan^2 \theta}. \quad (2)$$

Broj vrhova u području δx je $N(x)\delta x$, gdje je $N(x)\delta x$ vjerojatni broj vrhova koji se pojavljuju između visina x i $x + \delta x$ i

$$N(x) = \left(\frac{n}{P\sqrt{2\pi}} \right) \cdot e^{-\frac{x^2}{2\sigma^2}}, \quad (3)$$

gdje je:

n = ukupan broj vrhova površinskih neravnina, a

σ = standardna devijacija.

Doprinos području kontakta računa se prema izrazu:

$$\pi \left[\frac{(x-x_0)^2}{\tan^2 \theta} \right] N(x) \delta x, \quad (4)$$

iz čega slijedi da ukupni doprinos području kontakta na osi X iznosi:

$$A_x = \int_{x_0}^{\infty} \pi \frac{(x-x_0)^2}{\tan^2 \theta} N(x) \delta x. \quad (5)$$

Kada se u gornji izraz uvrsti izraz (3) dobije se slijedeći izraz:

$$A_x = \frac{n}{\tan^2 \theta} \left(\frac{\pi}{2\sigma^2} \right)^{\frac{1}{2}} \int_{x_0}^{\infty} (x-x_0)^2 e^{\left(\frac{-x^2}{2\sigma^2} \right)} dx \quad (6)$$

koji nakon integracije postaje:

$$A_x = \frac{n\pi}{\tan^2 \theta} \left\{ \frac{x_0^2 + \sigma^2}{2} \left[1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x_0}{\sigma\sqrt{2}} \right) \right] - \frac{x_0\sigma}{\sqrt{2\pi}} e^{\left(\frac{-x_0^2}{2\sigma^2} \right)} \right\}. \quad (7)$$

Izraz (7) prikazuje ovisnost područja kontakta o vertikalnom pomaku od prosječne vrijednosti, x . Uvrštavanjem izraza (1) u izraz (7) dolazi se do izraza (8) koji pokazuje ovisnost između pomaka, x i opterećenja, F .

$$F = \frac{n\pi}{\tan^2 \theta} P_m \left\{ \frac{x_0^2 + \sigma^2}{2} \left[1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x_0}{p\sqrt{2}} \right) \right] - \frac{x_0 p}{\sqrt{2\pi}} e^{\left(\frac{-x_0^2}{2\sigma^2} \right)} \right\}.. \quad (8)$$

Sada možemo definirati karakteristiku površine, N , kao omjer broja vrhova, n , i nominalne površine, A i pisati izraz za raspodjelu tlaka, p , na površini limova.

$$p = \frac{N\pi p_m}{\tan^2 \theta} \left\{ \frac{x_0^2 + \sigma^2}{2} \left[1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x_0}{p\sqrt{2}} \right) \right] - \frac{x_0 p}{\sqrt{2\pi}} e^{\left(\frac{-x_0^2}{2\sigma^2} \right)} \right\}.. \quad (9)$$

Poznato je da se vrijednost x_0 mjeri u odnosu na srednju vrijednost i proteže do beskonačnosti. Kako bi to povezali sa eksperimentalnim mjerenjima, prikladno je i uvodi zanemarivu pogrešku u rezultate prekinuti krivulju vjerojatnosti na vrijednosti jednakoj trostrukoj vrijednosti standardne devijacije pri čemu izraz za vertikalni pomak glasi:

$$x = 3\sigma - x_0.. \quad (10)$$

Određene vrijednosti korištene u izrazima poznate su iz prijašnjih istraživanja za dvije vrste čeličnih limova koje se koriste u proizvodnji transformatora i dane su u tablici 1.

Tablica 1. Svojstva transformatorskih limova [4]

	Toplo valjani	Hladno valjani
p_m [MPa]	46	46
$\tan\theta$	0,17	0,05
σ [mm]	0,004	0,0008
N	5000	1500

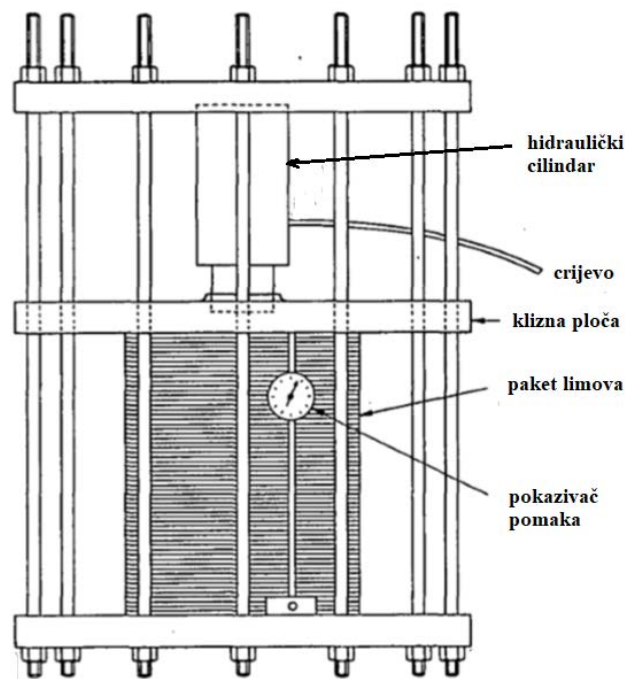
4. ANALIZA POSTOJEĆIH RJEŠENJA I EKSPERIMENATA

4.1. Eksperimenti

Prije početka koncipiranja ispitnog postolja potrebno je proanalizirati do sada provedena eksperimentalna ispitivanja koja su za cilj imala opisivanje raspodjele kontaktnog tlaka koristeći različite metodologije rada i mjerne instrumente te ispitivanja koja su za cilj imala opisivanje ponašanja laminirane jezgre izložene tlačnom opterećenju. Na kraju analize potrebno je iznijeti određene zaključke te, ukoliko je prikladno, usporediti prednosti i mane pojedinih metoda eksperimentalnog ispitivanja.

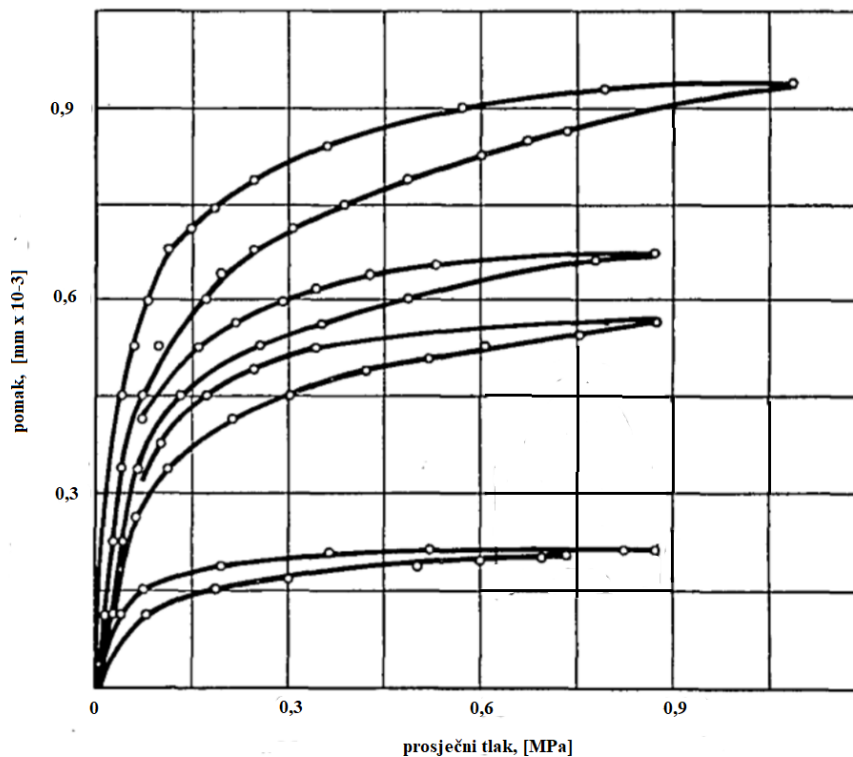
4.1.1. Ponašanje laminirane jezgre izložene tlačnom opterećenju

U svom radu [1] Walker i sur. istražili su povezanost između aksijalnog pomaka paketa limova i opterećenja koje uzrokuje navedeni pomak. Hidraulička preša upotrijebljena za stlačivanje paketa limova, prikazana na slici 8, u mogućnosti je tlačiti paket maksimalnom silom u iznosu od 20 tona, odnosno do nazivnog tlaka od oko 1,7 MPa.



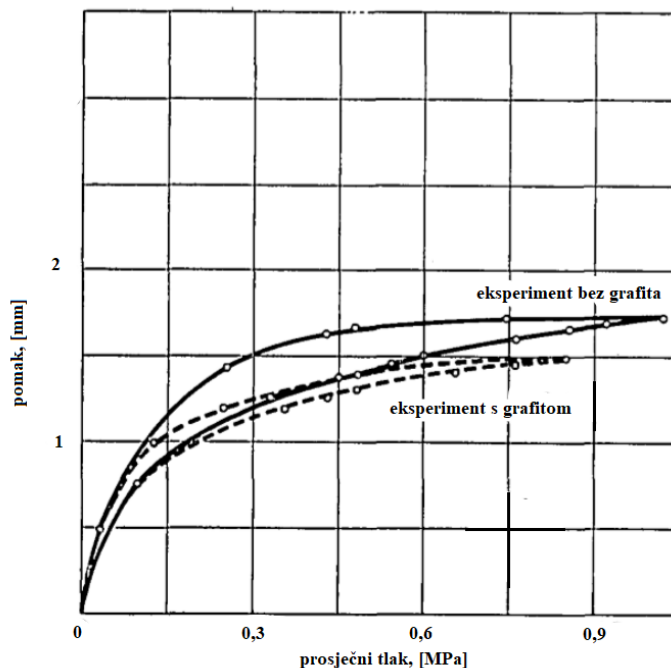
Slika 8. Hidraulička preša [4]

Ispitni uzorci koji su se koristili prilikom ispitivanja bili su dimenzija 228,6 mm x 152,4 mm budući da su takvi ispitni uzorci jeftiniji i lakši za rukovanje od cjelovitih jezgri. Do odnosa između aksijalnog pomaka i opterećenja dolazi se na sljedeći način: za svako opterećenje izmjerena je visina paketa u više točaka i izračunao se prosjek, a razlika između visine paketa kod određenog opterećenja i visine s nulnim opterećenjem definirana je kao aksijalni pomak. Tipične krivulje dobivene na ovaj način prikazane su na slici 9.



Slika 9. Ovisnost aksijalnog pomaka o opterećenju [4]

Može se vidjeti da svaka krivulja ima značajno polje histereze koja je vjerojatno bila posljedica trenja među limovima. Da bi se to potvrdilo, ponovljen je jedan tipičan eksperiment, ali sa svim listovima obloženim grafitnim prahom prije sastavljanja. Usporedba tih rezultata s inicijalnim prikazana je na slici 10 i na njoj je vidljivo značajno smanjenje polja histereze što je jasan pokazatelj da je trenje među limovima zaista uzrok pojave histereze.



Slika 10. Usporedba eksperimenata s grafitnim prahom i bez njega [4]

Nadalje, korištenjem različitih veličina ispitnih uzoraka došlo se do zaključka da za određeni tlak aksijalni pomak raste gotovo linearno s veličinom ispitnog uzorka što znači da parametar veličine ispitnog uzorka ne utječe na određivanje kontaktnog tlaka među limovima.

4.1.1.1. Optimalni uniformni kontaktni tlak među limovima

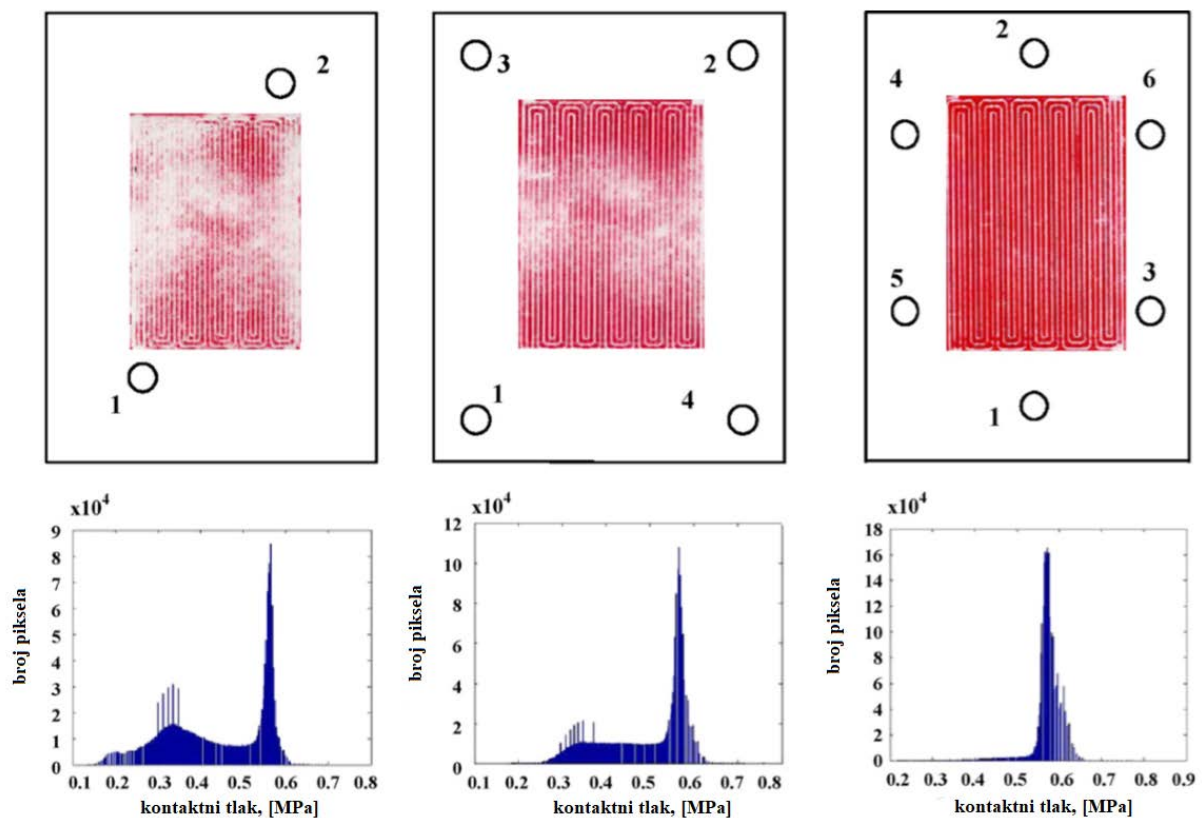
Sa slika 3 i 4 vidljiv je značajan aksijalni pomak paketa limova s povećanjem opterećenja do oko 0,3 MPa, dok s daljnjim povećanjem opterećenja gotovo da i ne dolazi do deformacije paketa, tj aksijalni pomak ostaje konstantan. Činjenica da kompaktnost jezgre gotovo i ne raste s povećanjem opterećenja iznad 0,3 MPa, a cijena steznog sustava raste jasan je pokazatelj da nema smisla pokušati osigurati veći tlak od gore navedenog.

4.1.2. Mjerenje raspodjele kontaktnog tlaka

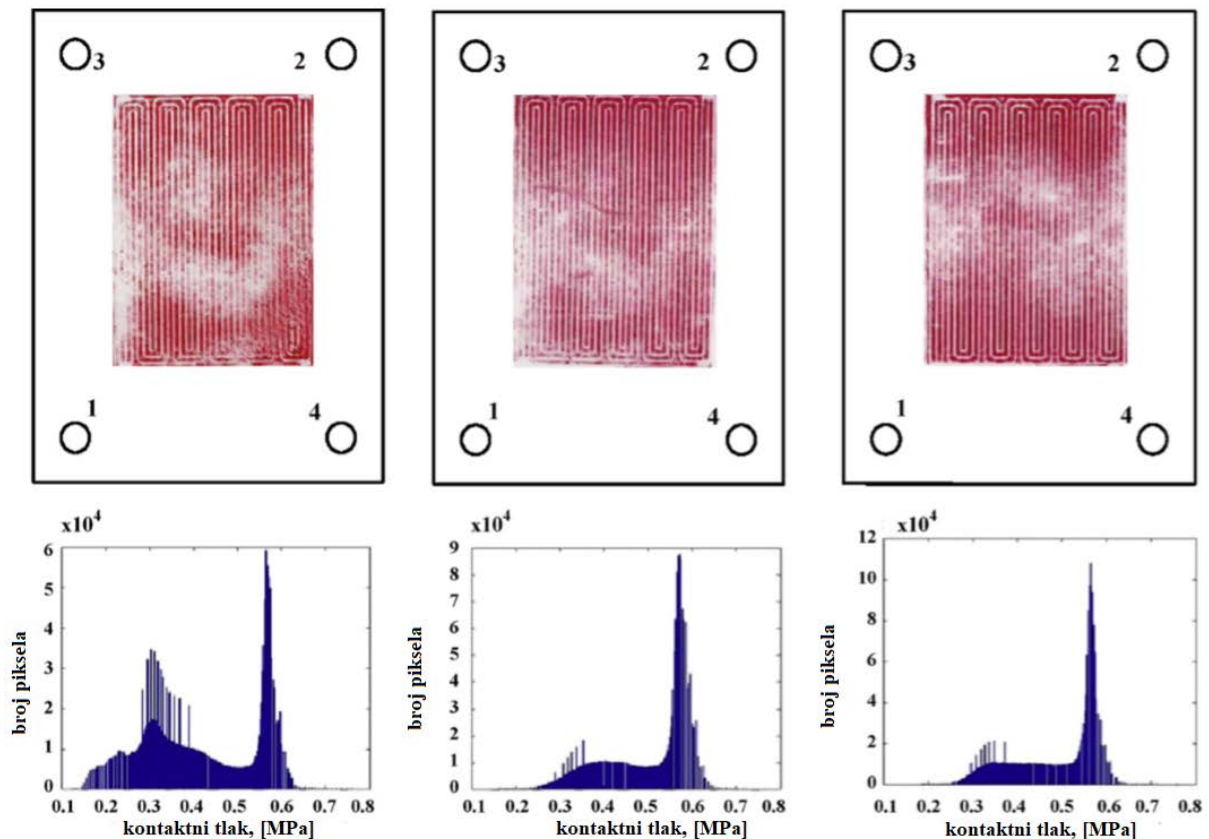
4.1.2.1. Mjerenje raspodjele kontaktnog tlaka korištenjem Fujifilm Prescale indikatorskog papira

U svom radu [2] Wen, C. -Y. i sur. eksperimentalno su istražili utjecaj različitih konfiguracija vijaka i momenata pritezanja tih istih vijaka na raspodjelu kontaktnog tlaka unutar gorive ćelije. Za očitavanje raspodjele kontaktnog tlaka koristili su se indikatorskim

papirom komercijalnog naziva *Fujifilm Prescale*. Eksperiment su proveli na način da su varirali tri konfiguracije vijaka i tri momenta pritezanja. Zatim su za svaku kombinaciju konfiguracije vijaka i momenta pritezanja izračunali prosječnu vrijednost i standardnu devijaciju raspodjele tlaka. Analogno koeficijentu turbulencije u mehanici fluida, za prikazivanje uniformnosti raspodjele kontaktnog tlaka koristili su koeficijent fluktuacije raspodjele tlaka. Iz dobivenih rezultata zaključili su da se maksimalna gustoća snage povećava i s povećanjem momenta pritezanja i s povećanjem broja vijaka što je prikazano na slikama 11 i 12.



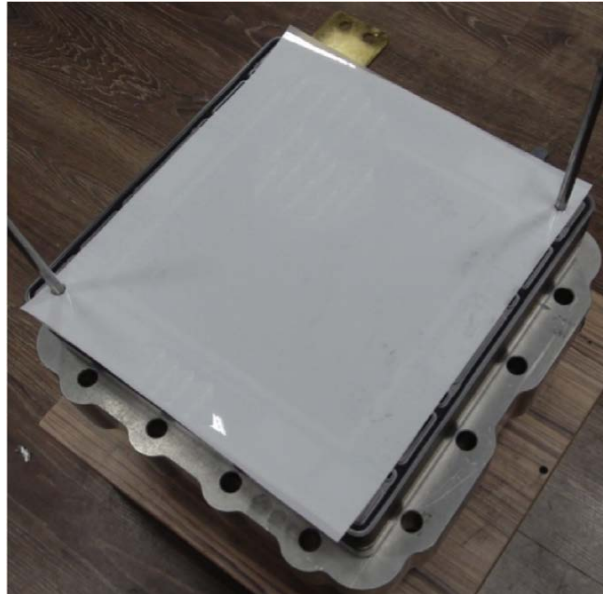
Slika 11. Utjecaj konfiguracije vijaka na raspodjelu tlaka [5]



Slika 12. Utjecaj momenta pritezanja vijaka na raspodjelu tlaka [5]

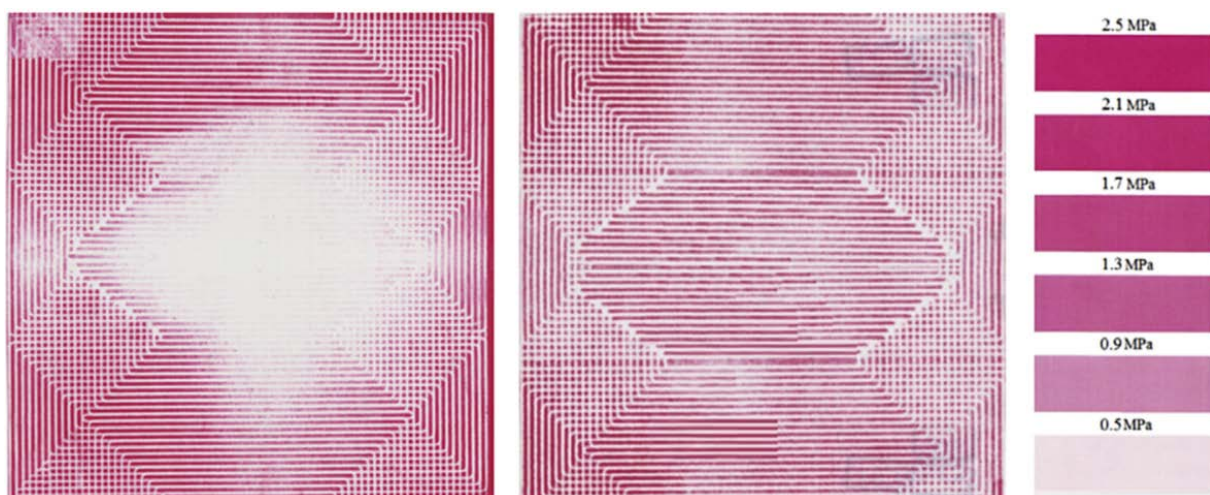
Nadalje, zaključili su da povećanjem prosječnog kontaktnog tlaka dolazi povećanja maksimalne snage bez obzira na konfiguraciju vijaka i moment pritezanja. Također, veći prosječni tlak povećava i jednolikost raspodjele tlaka, smanjujući pritom omski otpor i posljedično povećavajući maksimalnu snagu. Međutim, maksimalna snaga ne raste monotono sa prosječnim tlakom što autori pripisuju utjecaju detaljne raspodjele tlaka.

U radu nešto novijeg datuma [3] Alizadeh, E. i sur. istražili su utjecaj debljine i materijala steznih ploča, tvrdoće brtvila te pozicije i broja ćelija na raspodjelu kontaktnog tlaka unutar gorive ćelije korištenjem metode konačnih elemenata. Kako bi ubrzali konvergenciju rezultata trodimenzionalni model zamijenili su dvodimenzionalnim. Rezultati simulacije uspoređeni su s eksperimentalno ostvarenim rezultatima korištenjem *Fujifilm Prescale* indikatorskog papira. Eksperimentalni postav i način pozicioniranja papira prikazani su na slici 13.



Slika 13. Način pozicioniranja *Fujifilm Prescale* papira [6]

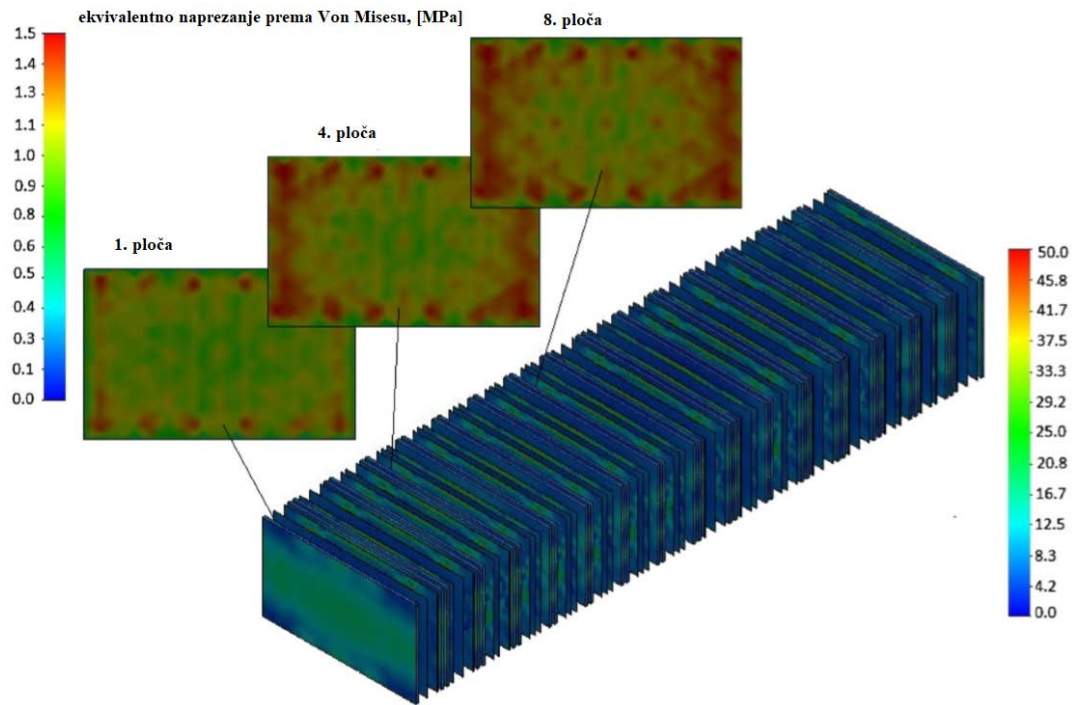
Zaključili su da izborom prikladnog materijala i debljine steznih ploči mogu povećati njezinu krutost i tako osigurati uniformniju raspodjelu tlaka. Također, osim povećanjem krutosti stezne ploče, pokazali su da se njezina deformacija može smanjiti smanjenjem sile u vijcima što su postigli uporabom mekšeg brtvila. I kao posljednje, zaključili su da povećanjem broja ćelija također dolazi do uniformnije raspodjele tlaka. Primjer ostvarene raspodjele kontaktnog tlaka prikazan je na slici 14.



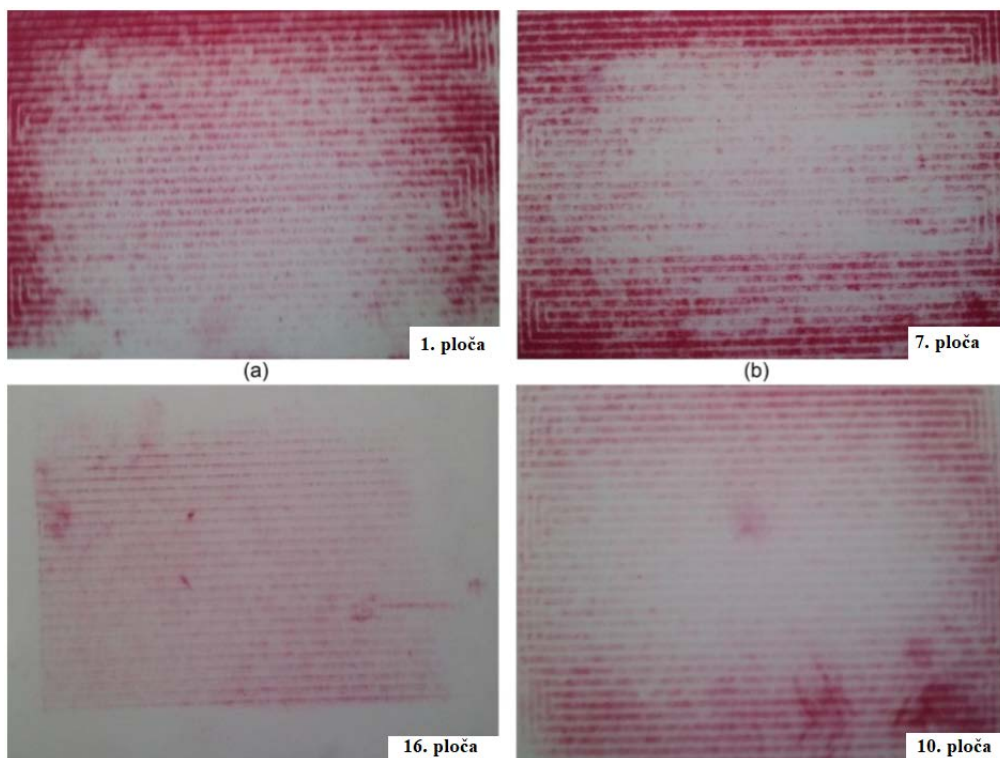
Slika 14. Utjecaj debljine stezne ploče na raspodjelu tlaka [6]

Posljednje istraživanje u kojem se koristi *Fujifilm Prescale* predstavljeno je u [5]. U njemu je istražen utjecaj momenta pritezanja vijka na raspodjelu kontaktnog tlaka unutar gorive ćelije. Za analizu je korištena metoda konačnih elemenata, a rezultati simulacije uspoređeni su s eksperimentalno ostvarenim rezultatima iz kojih je vidljivo jako dobro

podudaranje. Posebnost ovog rada očituje se u korištenju *Prescale* papira na više razina unutar sklopa gorive ćelije što je dalo uvid u raspodjelu tlaka na različitim elementima sklopa. Raspodjela tlaka ostvarena numeričkom analizom prikazana je na slici 15, a raspodjela dobivena eksperimentalno na slici 16.



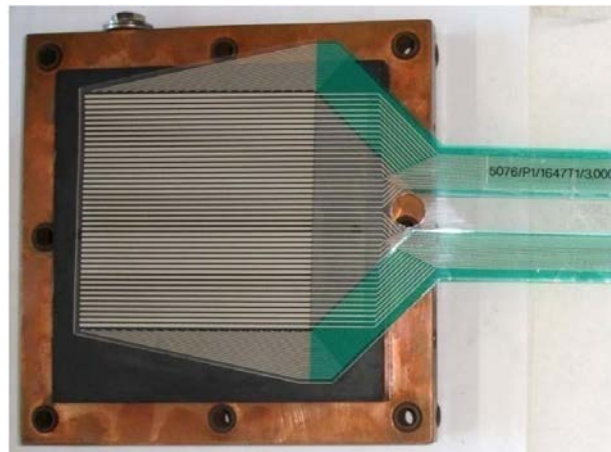
Slika 15. Rezultati numerički ostvarene raspodjele tlaka [7]



Slika 16. Rezultati eksperimentalno ostvarene raspodjele tlaka [7]

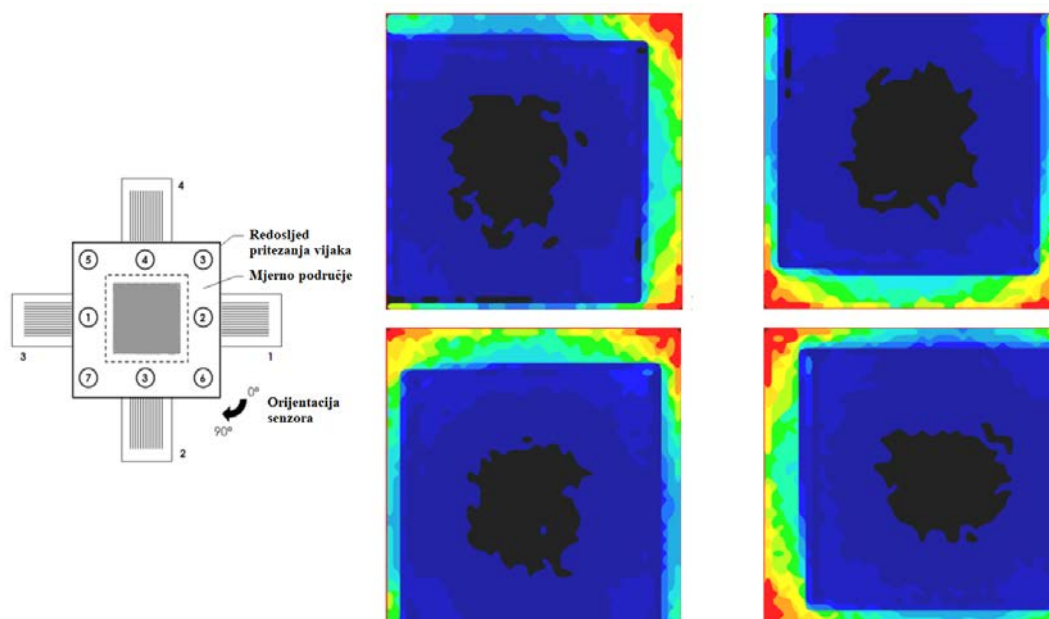
4.1.2.2. Mjerenje kontaktnog tlaka korištenjem matričnog senzora

U svom radu Montagnini, R. i sur. predstavili su eksperimentalni pristup koji omogućava mjerenje i nadziranje raspodjele kontaktnog tlaka unutar gorive ćelije s promjenom tlaka stezanja. Predložena metodologija temelji se na korištenju tankog, matričnog, piezootporničkog senzora koji je postavljen na središnju ravninu sklopa gorive ćelije. Smještaj senzora unutar gorive ćelije prikazan je na slici 17.



Slika 17. Pozicija matričnog senzora [8]

Rezultati proizašli iz ovog istraživanja prikazani na slici 18 ističu učinkovitost predloženog mjernog postava koja se očituje u prikupljanju kvantitativnih podataka o odnosu između stvarne raspodjele tlaka unutar gorive ćelije i primijenjenog vanjskog momenta pritezanja.



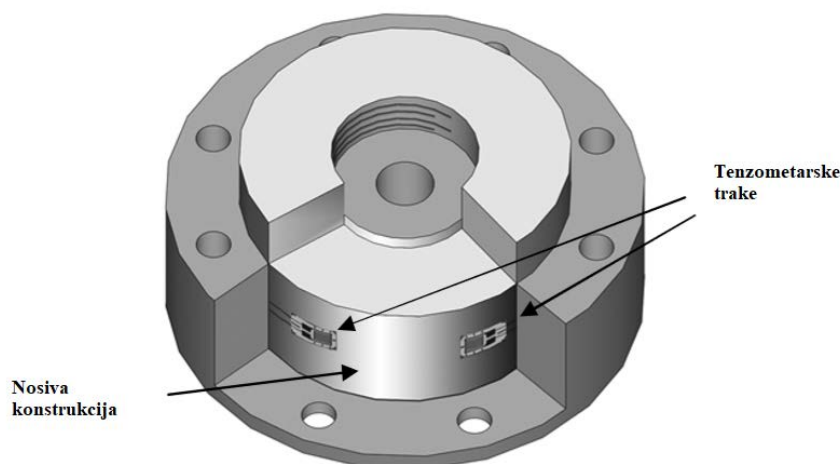
Slika 18. Redosljed pritezanja vijaka i rezultati raspodjele tlaka [8]

5. ANALIZA METODA ZA MJERENJE RASPODJELE KONTAKTNOG TLAKA

U prethodnom poglavlju analizirani su eksperimenti u kojima se mjerila raspodjela kontaktnog tlaka. Izvršen je kratki pregled postavki mjerenja, ispitnih postolja te je napravljena analiza dobivenih rezultata. Autori tih eksperimenata koristili su različite metode za očitavanje raspodjele kontaktnog tlaka. Međutim, ostao je nejasan kriterij odabira točno određene metode, zbog čega će u ovom poglavlju biti detaljno analizirane tri potencijalne metode uz navođenje prednosti i nedostataka.

5.1. Ploča s više mjernih pretvornika sile

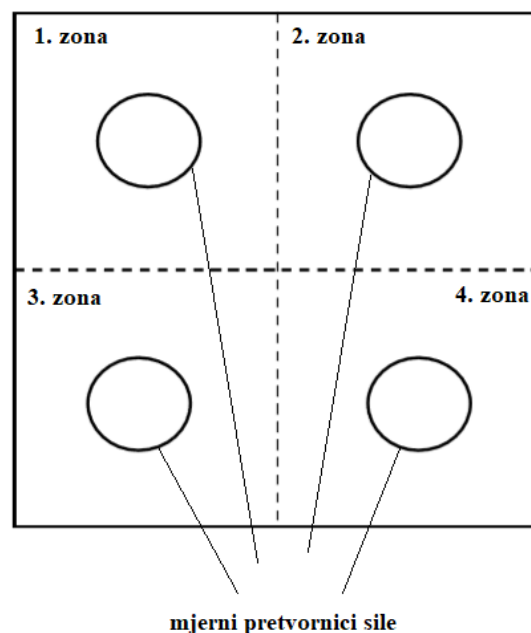
Naširoko poznati mjerni pretvornik sile je tzv. mjerna ćelija (*Load Cell*) koji može koristiti razne elemente za detekciju opterećenja kao što su: tenzometarske trake, piezoelektrični elementi ili kapacitivni elementi. Ovisno o primijenjenoj sili i mehanici primjene te sile, koriste se različiti oblici mjernih pretvornika. Jedna od najpouzdanijih mjernih ćelija je tlačna mjerna ćelija koja koristi tenzometarske trake za detekciju opterećenja prikazana na slici 19.



Slika 19. Mjerni pretvornik sile [9]

Uslijed opterećenja dolazi do deformacije nosive konstrukcije što uzrokuje naprezanje tenzometarskih traka kojima se pritom mijenja električni otpor, odnosno izlazni napon. Nakon umjeravanja, izlazni napon doveden je u vezu sa silom koja pritom opterećuje mjerni

pretvornik. Zbog robusnosti nosive konstrukcije, pouzdanost i točnost uređaja ostaju unutar jako uskih granica za širok raspon opterećenja. Tenzometarske trake omogućuju mjerenje kako tlačnih, tako i vlačnih sila. Međutim, robusna konstrukcija ima i jednu nepoželjnu karakteristiku, a to je otežano pozicioniranje i prikupljanje relevantnih podataka u skućenim područjima primjene. Nadalje, mjerni pretvornik može mjeriti samo silu primijenjenu na nosivu konstrukciju, tj. sama za sebe ne može prikazati raspodjelu kontaktnog tlaka na površini. U takvim slučajevima, nužno je upotrijebiti veći broj mjernih pretvornika kako bi se sila mjerila na više mjesta unutar kontaktnog područja. Slika 20 prikazuje primjer kontaktnog područja koje je podijeljeno u četiri zone, tj. koriste se četiri mjerna pretvornika kako bi se dobila približna informacija o raspodjeli kontaktnog tlaka.



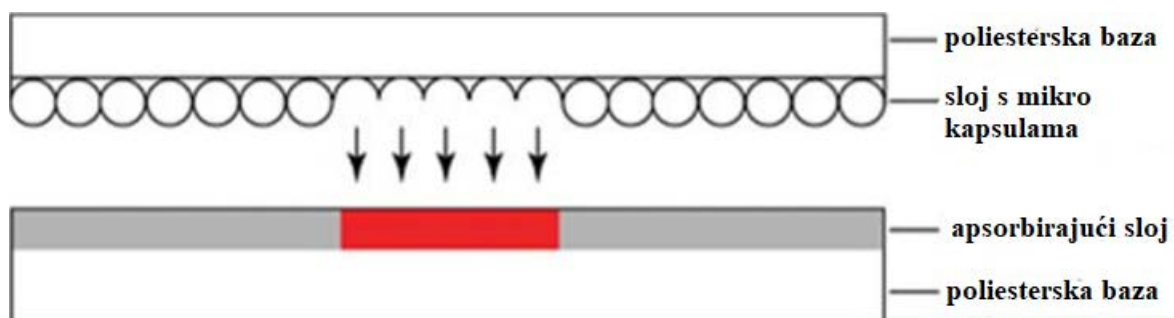
Slika 20. Podjela kontaktnog područja na četiri zone [9]

Ovakva konfiguracija daje prosječnu vrijednost tlaka za svaku zonu. Korištenjem većeg broja mjernih pretvornika postigla bi se naravno i finija raspodjela tlaka. Međutim, to za sobom povlači veći trošak mjerenja i otežava prikupljanje podataka budući da uređaj za prikupljanje podataka mora imati veći broj ulaza. Nedostatak ove metode predstavlja i sama veličina mjernog pretvornika koja ograničava gustoću mjernih točaka. Još jedan nedostatak dolazi do izražaja u slučaju kada se lokalna raspodjela tlaka razlikuje između mjernih točaka. Pri tom vršna vrijednost tlaka može biti promašena, a gradijent bi bio uprosječen vrijednostima susjednih mjernih točki. Nadalje, kako se takvi mjerni pretvornici obično ugrađuju u strukturu materijala, korištenje velikog broja mjernih pretvornika može utjecati na strukturni integritet uređaja te na taj način promijeniti ili iskriviti rezultate. I na kraju, u većini slučajeva kada je

sila primijenjena na neko područje nekonzistentna, mjerni pretvornik može pokazati ukupnu silu, ali ne može identificirati lokalne vršne vrijednosti tlaka.

5.2. Fujifilm Prescale indikatorski papir

Druga metoda koja se koristi za mjerenje raspodjele kontaktnog tlaka na sučelju dvaju površina je indikatorski papir. Unutar poliesterske baze nalaze se dva sloja prislonjena jedan uz drugi. Gornji sloj sadrži sitne mikro kapsule ispunjene bojom koje su izrađene na način da se lome pri različitim iznosima opterećenja, a donji je u suštini papir koji apsorbira boju. Kada se na indikatorski papir primjeni opterećenje dolazi do loma mikro kapsula koje otpuštaju boju na mjestu opterećenja. Povećavajući iznos opterećenja na određenom području dolazi do loma većeg broja mikro kapsula što rezultira većim intenzitetom boje otiska. Visoko osjetljivi indikatorski papir za mjerenje malih iznosa opterećenja uobičajeno se sastoji od dvije poliesterske folije kako bi sloj s mikro kapsulama i sloj s papirom koji apsorbira boju bili odvojeni dok se ne provede mjerenje, dok nisko osjetljivi uobičajeno imaju sve komponente na jednoj foliji. Shematski prikaz visoko osjetljivog indikatorskog papira prikazan je na slici 21.



Slika 21. Shematski prikaz indikatorskog papira [9]

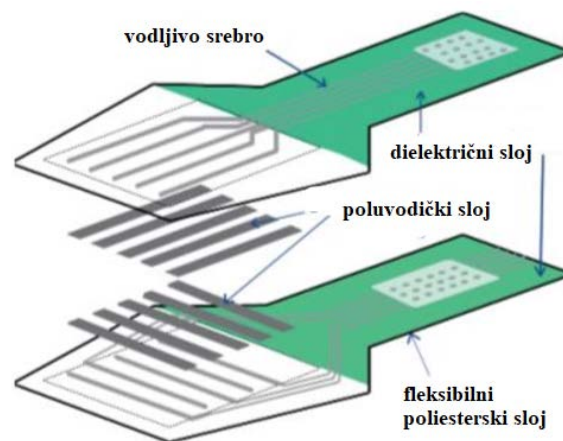
Ovaj, iako potrošni papir, posjeduje neke značajke koje mogu biti od koristi kod primjene u mjerenju raspodjele kontaktnog tlaka. Njegova fleksibilnost i mala debljina omogućuju uporabu u širokom rasponu primjena za mjerenje raspodjele kontaktnog tlaka. Također, može se izrezati u jedinstvene oblike kako bi se koristio u mjerenjima gdje postoje prepreke unutar mjernog područja. Budući da nema priključene elektronike, indikatorski papir može mjeriti raspodjelu kontaktnog tlaka između valjaka bez brige o drobljenju žica ili skupe elektronike. Ukoliko je potrebno, skener i softversko rješenje pružaju mogućnost digitalne obrade podataka.

S druge strane priroda indikatorskog papira je takva da može pružiti očitavanje samo vršnih vrijednosti kontaktnog tlaka koje se javljaju tijekom mjerenja. To ima očita

ograničenja pri pokušaju dinamičkih mjerenja, ali u određenim slučajevima može negativno utjecati i na statička mjerenja. Primjer takvog slučaja bilo bi spajanje elemenata pomoću dva ili više vijčanih spojeva iz razloga što prilikom pritezanja jednog vijčanog spoja može doći do djelomičnog gubitka sile u susjednom. Indikatorski papir ne može uzeti u obzir gubitak sile i može se dogoditi da konstruktor precijeni vrijednost sile koja ostaje u vijku nakon pritezanja.

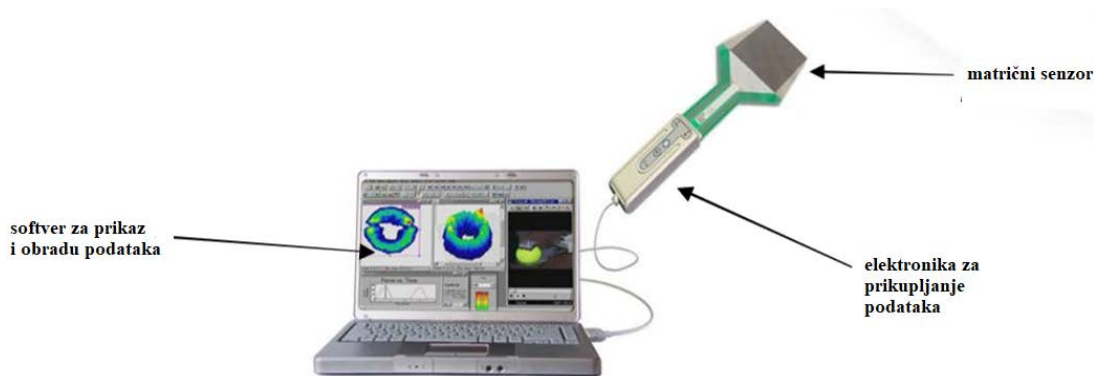
5.3. Matrični senzor

Uobičajeni tip matričnog senzora sastoji se od dva sloja fleksibilnog poliestera na koja je otisnuto vodljivo srebro i piezootporničkog materijala koji se nalazi između. Senzor prikazan na slici 22 odlikuje se izrazito malom debljinom od oko 0,1 mm koja omogućuje široko područje njegove primjene uz unos minimalnog poremećaja u ponašanje ispitivanog sustava.



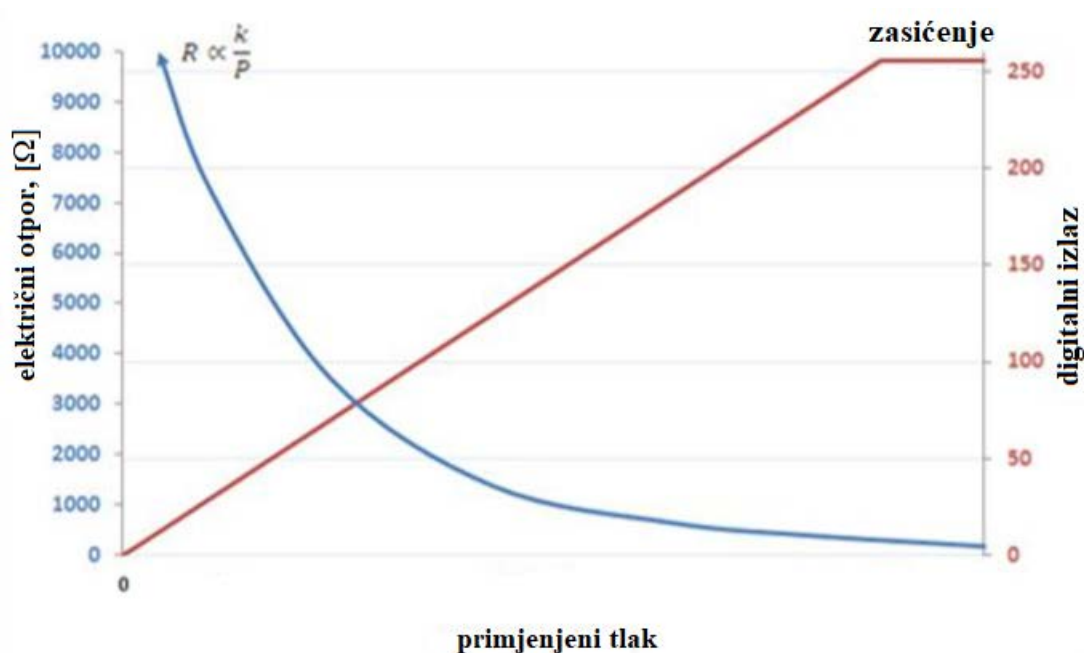
Slika 22. Matrični senzor [9]

Tragovi vodljivog srebra služe kao provodljiva staza za prijenos električnog signala kroz piezootporničku tintu. Povećanjem opterećenja na mjerno područje mijenja se otpor tinte, a elektronika prikuplja analogne podatke koji se pretvaraju u digitalni signal koji se zatim prenosi u računalo. Dijelovi mjernog sustava prikazani su na slici 23.



Slika 23. Mjerni sustav koji koristi matrični senzor [9]

U neopterećenom stanju otpor tinte reda je veličine jednog $M\Omega$, a povećanjem opterećenja smanjuje se do reda veličine od desetak $k\Omega$. Kako bi rezultati mjerenja bili intuitivniji kao izlazna veličina koristi se provodljivost, tj. veličina obrnuto proporcionalna otporu, koja se linearizira kako bi se povezala s opterećenjem. Tipična pogreška linearnosti je manja od $\pm 3\%$. Primjenjujući poznato opterećenje na mjerno područje senzora, izlaz se lako može pretvoriti u mjerne jedinice tlaka. Kvalitativni dijagram ovisnosti otpora, odnosno provodljivosti o primijenjenom opterećenju prikazan je na slici 24.



Slika 24. Ovisnost otpora senzora o opterećenju [9]

Kako bi mogao mjeriti raspodjelu tlaka na cijelom području mjerenja senzor mora biti u stanju identificirati pozicije svih primijenjenih sila. Prethodno se postiže uz pomoć matrice koju čine vertikalno i horizontalno postavljene tragovi piezootporničke tinte na način da svako od sjecišta tih tragova predstavlja „sensel“, odnosno mjernu točku. Broj mjernih točaka u matrici definira prostornu rezoluciju senzora. Koncept mjerenja je zapravo jako sličan

konceptu koji je opisan u poglavlju 4.1. gdje se koristi veći broj mjernih pretvornika sile, međutim, priroda matičnog senzora je takva da ima puno veću gustoću mjernih točaka što pruža bolju prostornu rezoluciju raspodjele tlaka.

6. ULTRAZVUČNA METODA ZA MJERENJE SILE U VIJKU

Već je u uvodu rečeno da je iznimno bitno mjeriti unesenu silu u stezni sustav kako bi se osigurala ponovljivost mjerenja kontaktnog tlaka. U svim načinima stezanja jezgre transformatora polazi se od ostvarivanja sile u vijku, koja se onda kod određenih načina stezanja može dalje prenositi drugim steznim elementima kao što su trake ili prečke. Najpouzdanija i najekonomičnija metoda mjerenja sile u vijku prikazana je na slici 25, a temelji se na mjerenju produljenja vijka korištenjem ultrazvuka i ona će biti opisana u ovom poglavlju.



Slika 25. Mjerenje sile u vijku s pomoću ultrazvuka [10]

6.1. Princip rada

Princip rada ultrazvuka poznat je od davnih vremena i naširoko je korišten u radarskim i sonarnim sustavima. Fizikalna pozadina samog procesa poprilično je jednostavna i razumljiva, ultrazvučni signal odašalje se u smjeru promatranog objekta te se mjeri vrijeme proteklo od inicijalnog impulsa do njegovog odjeka što se naziva duljinom ultrazvuka. Taj princip moguće je primijeniti i u vijčanim spojevima. Naime, uslijed povećanja vlačnog opterećenja vijka prilikom pritezanja dolazi do produljenja vijka i pojave naprezanja u vijku. Kao posljedica toga javlja se smanjenje brzine zvuka unutar tijela vijka koje se zatim dovodi u vezu sa ostvarenom silom u vijku. Iako je koncept razmjerno jednostavan i ultrazvučno mjerenje može dati zapanjujuće točne rezultate, potencijalne poteškoće mogu se pojaviti pri izboru optimalnog vijka i ultrazvučnog pretvornika te pri njihovom povezivanju.

6.2. Frekvencija prijenosa i dubina prodiranja

Ultrazvučno mjerenje zahtijeva prijenos odgovarajuće količine ultrazvučne energije cijelom duljinom vijka. Najvažniji parametar u prijenosu te energije predstavlja odnos između frekvencije prijenosa i dubine prodiranja energije. U ovom trenutku može se povući analogija s radiovalovima kako bi prosječnom čitatelju bilo jasnije o čemu je riječ. AM radio signali emitiraju se na relativno niskim frekvencijama i mogu se primati na velikim udaljenostima, dok se kvalitetniji FM radio i televizijski signali emitiraju na mnogo višim frekvencijama i mogu se primati samo na kraćim udaljenostima. Isti fenomen postoji i kod ultrazvuka. Na nižim frekvencijama stvaraju se valovi veće valne duljine koji će imati veću dubinu prodiranja kroz određeni materijal, dok na visokim frekvencijama nastaju valovi manje valne duljine koji će imati manju dubinu prodiranja kroz isti materijal. Primjerice, impuls frekvencije od 1 MHz ima puno veću dubinu prodiranja od impulsa od 5 MHz. Prema tome, pretvornik niže frekvencije može postići odjek u duljem vijku ili u vijku izrađenom od metala s većom otpornošću na prijenos zvuka (tj. s većim prigušenjem). Međutim, iako niža frekvencija ima veću dubinu prodiranja, ona također stvara i više neželjene buke. Signal niske frekvencije ima tendenciju širenja, slično kao i ne fokusirani snop svjetlosti. Kada se na jednom kraju vijka unese signal niske frekvencije, njezin značajan dio odbija se s jedne na drugu stranu tijela vijka, stvarajući pritom bučan i izobličen odjek. S druge strane, visokofrekventni impulsi imaju tendenciju praćenja središnje linije vijka što rezultira manjom bukom i manjim izobličenjem odjeka.

6.3. Utjecaj promjera ultrazvučnog pretvornika

Odabir optimalnog ultrazvučnog pretvornika predstavlja zapravo kompromis između ultrazvučnog pretvornika s najjačim signalom, s jedne strane, i ultrazvučnog pretvornika s najboljim prigušenjem buke. Izravan utjecaj na gore navedena svojstva ima promjer pretvornika koji je općenito određen promjerom piezoelektričnog kristala. Naime, kristali većeg promjera imaju veću mogućnost slanja i primanja energije, uz manje poprečno rasipanje. Iz svega navedenog slijede koraci pri odabiru ultrazvučnog pretvornika:

1. odabir ultrazvučnog pretvornika s najvećim promjerom koji će u potpunosti nasjesti na kraj vijka
2. odabir ultrazvučnog pretvornika promjera navedenog u točki 1 s najvećom frekvencijom

3. odabir frekvencije ultrazvučnog mjerača jednake frekvenciji pretvornika te postavljanje širine impulsa na 1
4. odabir ultrazvučnog pretvornika istog promjera ali manje frekvencije ukoliko je jačina signala preslaba te ponovno postavljanje frekvencije uređaja
5. povećavanje širine impulsa ukoliko pretvornik sa smanjenom frekvencijom ne proizvodi odgovarajući odjek

6.4. Utjecaj stanja površine krajeva vijka na mjerenje

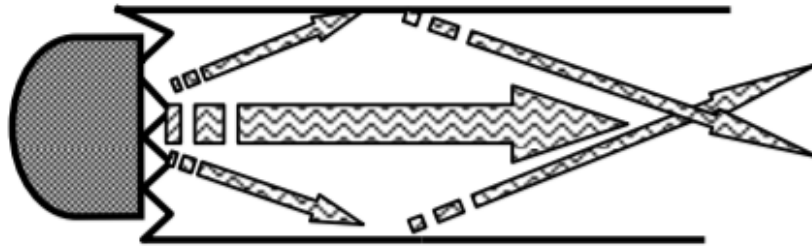
Prljavi, hrđavi, prejako obojani ili neravni krajevi vijaka stvaraju neujednačene odjeke i ometaju precizno izvođenje ultrazvučnog mjerenja. Odjek koji se pri povratku višestruko odbija od stjenke vijka putuje dulje od odjeka koji se vraća izravno duž osi vijka i tako stiže do ultrazvučnog pretvornika nešto kasnije. Ti preklapajući odjeci tumače se od strane uređaja za obradu signala kao jedan iskrivljeni signal, čija frekvencija ne odgovara frekvenciji inicijalnog impulsa. Slične probleme stvaraju i krajevi vijaka koji nisu okomiti te savijanje vijka pod opterećenjem. Savijanje vijaka poprilično je uobičajena pojava, a događa se ili zbog odstupanja od paralelnosti dijelova u spoju, ili zbog savijanja tih dijelova tijekom pritezanja. Iz svega navedenoga slijede zahtjevi na stanje površine krajeva vijka i preporuke što bi se, ukoliko je moguće, trebalo izbjeći.

6.4.1. Strana vijka na koju se spaja ultrazvučni pretvornik

Za precizan prijenos signala potrebna je glatka površina kraja vijka kako bi aktivna površina nasjedanja mjernog pretvornika bila što veća. Kako bi se to postiglo potrebno je krajeve vijaka očistiti i izbrusiti.

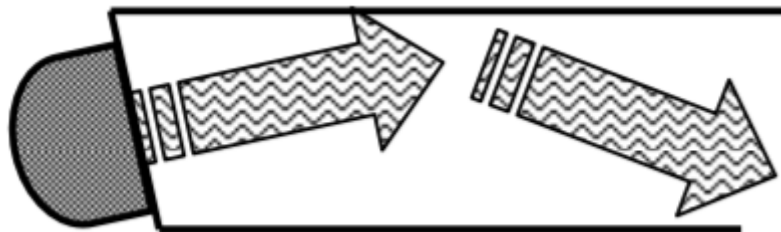
Što izbjegavati?

- Grube i nepravilne površine, koje sprečavaju adekvatan kontakt s pretvornikom. Male nepravilnosti ili hrapavost površine mogu se tolerirati uz upotrebu kontaktnog sredstva, ali prijenos energije i dalje će se smanjiti i raspršiti, kao što je prikazano na slici 26.



Slika 26. Utjecaj hrapavosti površine na ultrazvučni signal [11]

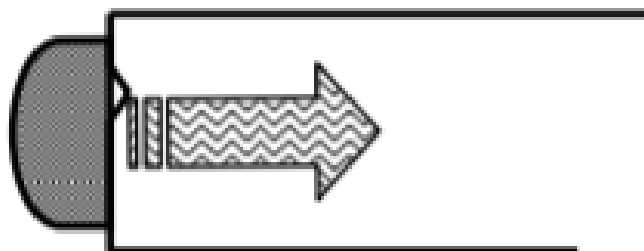
- Krajeve vijaka koji nisu okomiti na os vijka, kao što je prikazano na slici 27. Odstupanje od okomitosti rezultira lošom kvalitetom signala i mogućim pogreškama u mjerenju. Dozvoljeno odstupanje od okomitosti iznosi maksimalno 2 stupnja.



Slika 27. Utjecaj odstupanja od okomitosti na ultrazvučni signal [11]

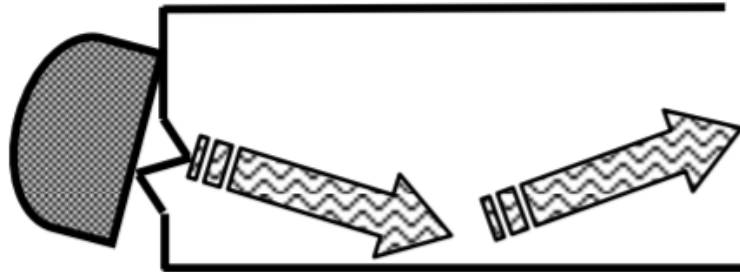
- Zahrđale, prljave i debelo obojane površine krajeva vijka. Ovakve prevlake otežavaju prijenos ultrazvučnog signala između pretvarača i vijka. Vrlo tanak sloj može se tolerirati.

- Vijke koji na krajnjim površinama imaju udubljena oznaka stupnja kvalitete, kao što je prikazano na slici 28. I ovdje se može upotrijebiti kontaktno sredstvo za popunjavanje malih udubljenja. Mala udubljenja uzrokuju izvjestan gubitak snage signala, ali normalno mjerenje je i dalje moguće. Velika ili brojna udubljenja uzrokuju da je signal preslab za pouzdano mjerenje.



Slika 28. Utjecaj udubljenja na glavi vijka na ultrazvučni signal [11]

• Vijke koji na krajnjim površinama imaju izdignute oznake stupnja kvalitete ili udubljenja s povišenim rubom, zbog kojih se pretvarač nalazi pod kutom u odnosu na os vijka, sprečavajući na taj način odgovarajući kontakt, kao što je prikazano na slici 29.



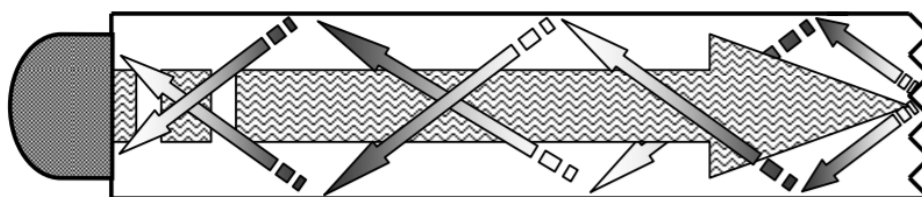
Slika 29. Utjecaj udubljenja s povišenim rubom na ultrazvučni signal [11]

6.4.2. Suprotna strana vijka

I za suprotnu stranu vijka vrijedi iste napomene kao i u prethodnom poglavlju.

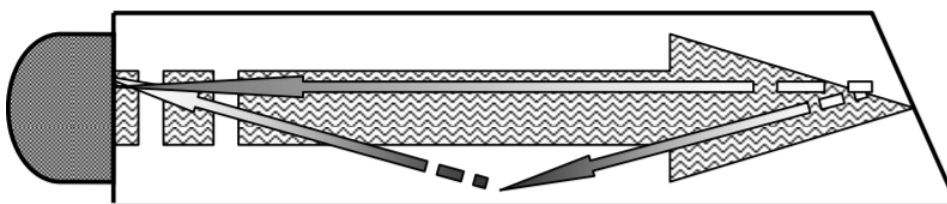
Što izbjegavati?

• Hrapavu površinu. Kao što je prikazano na slici 30, ako je kraj vijka od kojeg se reflektira ultrazvučni signal hrapav ili zakrivljen, većina će se reflektiranog signala raspršiti i pretvornik će primiti slab ili izobličen odjek.



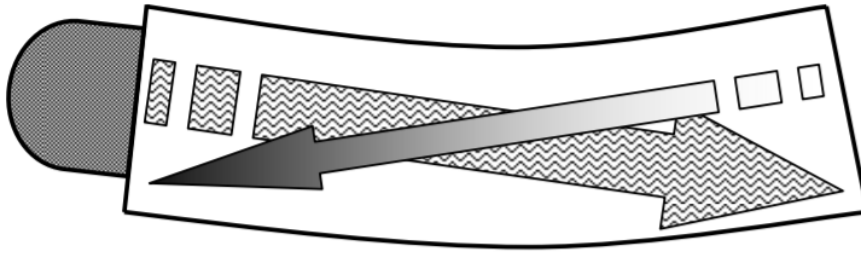
Slika 30. Utjecaj hrapavosti reflektirajuće strane vijka na ultrazvučni signal [11]

• Krajeve vijka koji nisu okomiti na os vijka. U tom slučaju dolazi do odbijanja ultrazvučnog signala od bočnih stjenki vijaka, kao što je prikazano na slici 31.



Slika 31. Utjecaj odstupanja od okomitosti reflektirajuće strane vijka na ultrazvučni signal [11]

- Vijke čiji krajevi nisu međusobno paralelni što je prikazano na slici 32. Do odstupanja od paralelnosti dolazi obično zbog savijanja vijaka.



Slika 32. Utjecaj odstupanja od paralelnosti na ultrazvučni signal [11]

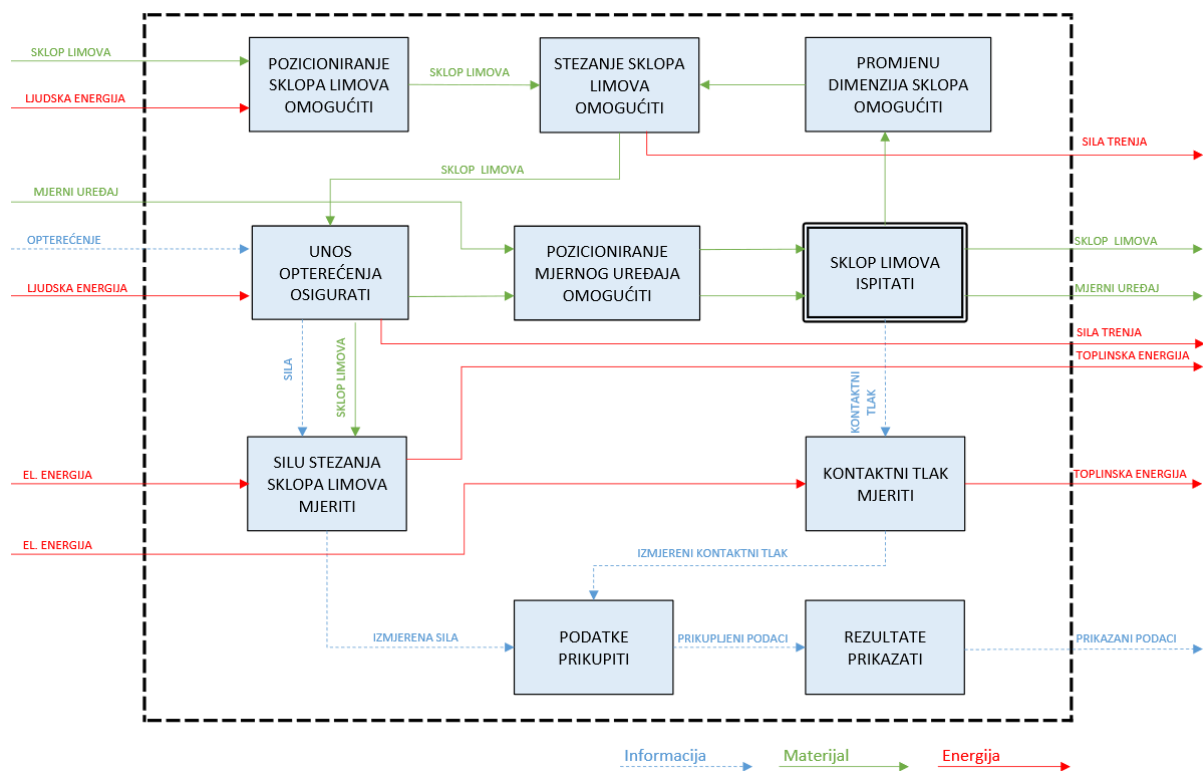
6.5. Korištenje kontaktnog sredstva

Ultrazvučni signal frekvencije koju koristi ultrazvučni mjerač dobro putuje kroz čvrste materijale i većinu tekućina, no ne i zrakom. Ovaj varijabilni otpor prolasku zvučnog signala naziva se zvučna impedancija. Nagla promjena impedancije događa se kada ultrazvučni signal pokušava prijeći granicu metal / zrak na kraju vijka, što uzrokuje reflektiranje većine signala u obliku odjeka. Svaki zračni zazor između mjernog pretvornika i kraja vijka spriječit će prijenos ultrazvučnog signala. Zbog toga se preporuča upotreba tekućeg kontaktnog sredstva između pretvornika i vijka. Budući da tekućina ima zvučnu impedanciju bližu materijalu pretvornika i vijka nego zraku, njezinom upotrebom stvara se kontinuirani put za odlazni signal i odjek. Mnoge tekućine mogu poslužiti kao adekvatno kontaktno sredstvo, međutim tekućine s nižim prigušenjem zvuka će dati bolje rezultate. Takve su, na primjer, tekućine koje sadrže glicerol. Može se koristiti i voda, međutim, ne preporuča se jer u određenim primjenama može biti opasna. Jedina svrha kontaktnog sredstva je da popuni zračni zazor između pretvarača i kraja svornjaka što se lakše postiže viskoznom tekućinom. Međutim, i tu treba biti pažljiv jer vrlo viskozne tvari mogu stvoriti tako debeli sloj između pretvornika i vijka da se mogu pojaviti pogreške u mjerenju. Također, vrlo viskozne tvari mogu zarobiti i mjehuriće zraka, što sprečava adekvatan prijenos ultrazvučnog signala.

7. KONCEPTUALNA RAZRADA

7.1. Funkcijska struktura

Analizom problema ispitivanja kontaktnog tlaka mogu se konstatirati određeni zahtjevi iz kojih proizlaze funkcije koje ispitno postolje mora biti u stanju ispuniti. Stoga je na temelju tih zahtjeva izrađena funkcijska struktura ispitnog postolja, prikazana na slici 33, prema kojoj će se zatim generirati koncepti.




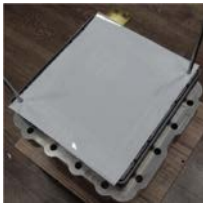
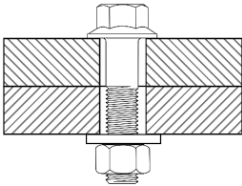



Slika 33. Funkcijska struktura

7.2. Morfološka matrica

Sljedeći korak koji vodi ka generiranju koncepata je pronaći nekoliko mogućih rješenja za svaku od funkcija u funkcijskoj strukturi što je prikazano u tablici 2.

Tablica 2. Morfološka matrica

Br.	Funkcija	Rješenje 1	Rješenje 2	Rješenje 3
1.	Pozicioniranje sklopa limova omogućiti	Ručno 	Robotska ruka 	Mosni granik 
2.	Promjenu dimenzija sklopa omogućiti	I profil s rupama	Linearni klizač	Sustav zupčanik – zubna letva
3.	Pozicioniranje mjernog uređaja omogućiti	Steznim napravama	Svornjacima za pozicioniranje 	Magnet
4.	Stezanje sklopa limova omogućiti	Vijčani spoj 	Kompozitna traka 	Prečke

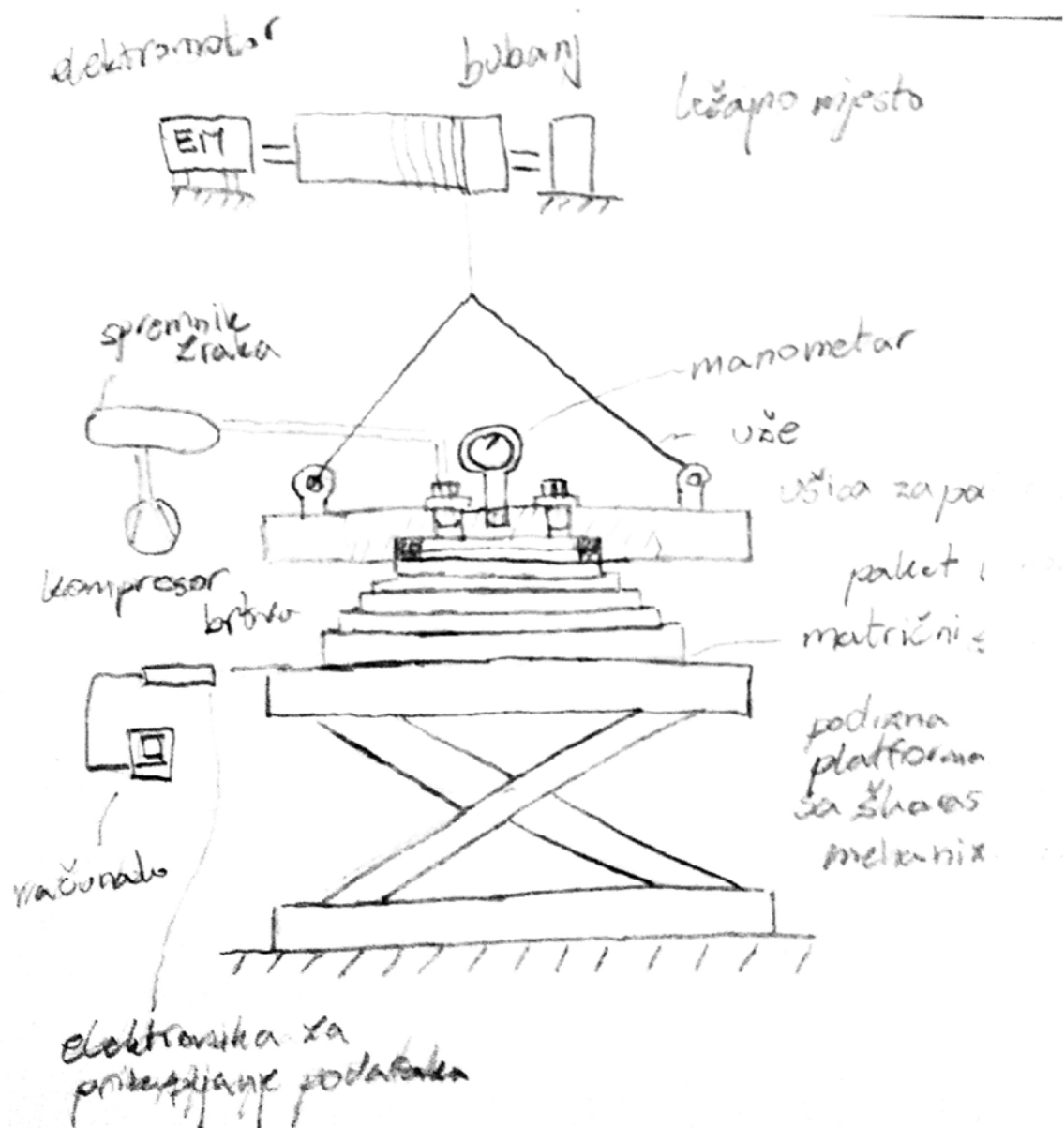
<p>5.</p>	<p>Unos opterećenja osigurati</p>	<p>Standardni ključ</p> 	<p>Moment ključ</p> 	<p>Hidraulički zatezač</p> 
<p>6.</p>	<p>Silu stezanja sklopa limova mjeriti</p>	<p>Tenzometarska traka</p> 	<p>Ultrazvučni mjerač</p> 	<p>Mjerni pretvornik pomaka</p> 
<p>7.</p>	<p>Kontaktni tlak mjeriti</p>	<p>Indikatorski papir</p> 	<p>Matrični senzor</p> 	<p>Matrica mjernih pretvornika sile</p> 
<p>8.</p>	<p>Podatke prikupiti</p>	<p>Mjerno pojačalo</p> 	<p>Skener</p> 	
<p>9.</p>	<p>Rezultate prikazati</p>	<p>Računalo</p> 	<p>Prikazom na interaktivnom sučelju uređaja</p>	<p>Mobilni telefon</p> 

7.3. Koncepti

Za definirani problem generirano je ukupno 6 koncepata ispitnog postolja koristeći ponuđena parcijalna rješenja navedena u morfološkoj matrici. Bitno je napomenuti da je svaki od koncepata u mogućnosti koristiti sva tri načina mjerenja kontaktnog tlaka zbog čega to nije posebno napominjano prilikom predstavljanja svakog od koncepata. Isto tako, svakom od koncepata potrebno je osigurati elektroniku za prikupljanje i računalo za obradu podataka, ali to nije bilo predmetom ovog rada.

7.3.1. Koncept 1

Ispitno postolje prikazano na slici 34 temelji se na ostvarenju kontaktnog tlaka među limovima tlačenjem zraka u prostor između gornje stezne ploče i prvog paketa limova. Pozicioniranje donje ploče izvedeno je pomoću škarastog mehanizma, a gornje preko užeta koje se namata na bubanj pokretan elektromotorom. Kako ne bi došlo do propuštanja zraka potrebno je osigurati dobro brtvljenje između gornje ploče i prvog paketa limova. Uređaj je opremljen manometrom kako bi se mogao vrlo precizno izmjeriti tlak kojim se opterećuju limovi.

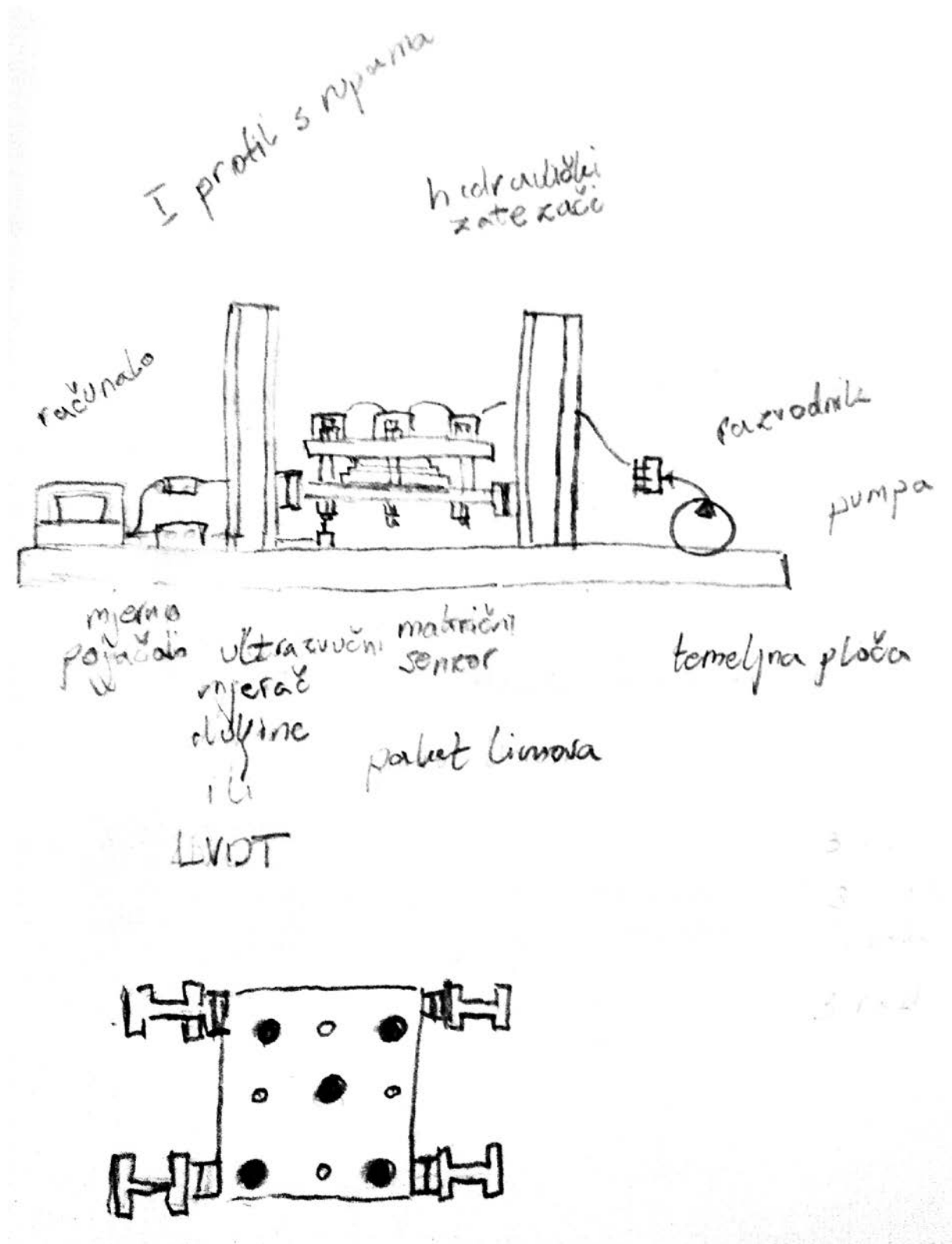


Slika 34. Prvi koncept

7.3.2. Koncept 2

Ispitno postolje prikazano na slici 35 temelji se na ostvarenju kontaktnog tlaka među limovima silom vijčanog spoja koja se ostvaruje primjenom hidrauličnog zatezača na gornjoj polovici vijaka. Korištenje hidrauličnog zatezača umjesto konvencionalnih moment ključeva preporučuje se iz razloga što se na taj način osigurava jednak unos sile u svim vijcima i ne dolazi do otpuštanja susjednih vijaka kao kod pojedinačnog pritezanja. Mjerenje sile u vijku kod ovog koncepta dodatno se može vršiti mjernim pretvornikom pomaka koji se može jednostavno učvrstiti na temeljnu ploču. Promjena pozicije gornje ili donje stezne ploče može

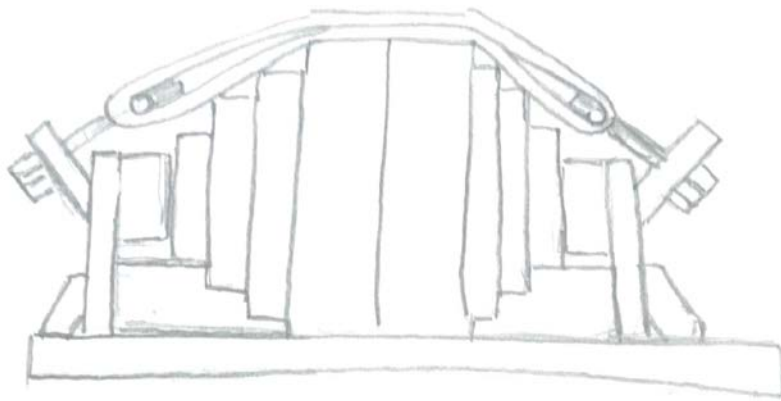
se kod ovog koncepta ostvariti na dva načina. Prvi način je da se izbuši matrica rupa na bočnim I profilima ili da se na njih ugradi klizač.



Slika 35. Drugi koncept

7.3.3. *Koncept 3*

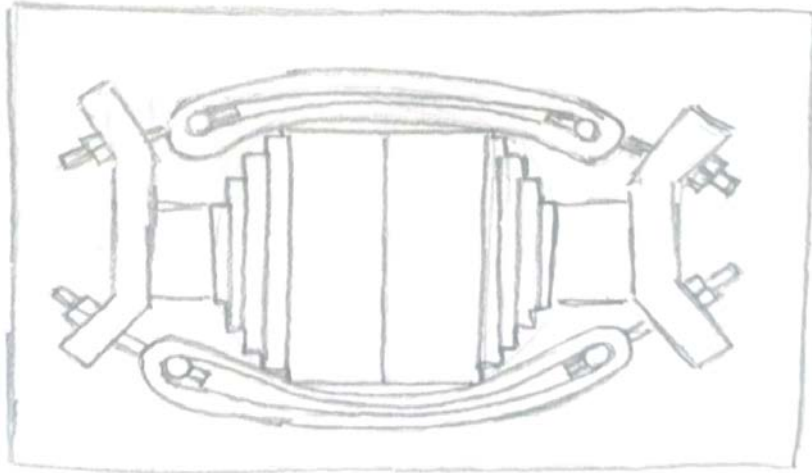
Ispitno postolje prikazano na slici 36 temelji se na ostvarenju kontaktnog tlaka među limovima sustavom vijak – stezna traka. Pritezanjem vijaka moment ključem ostvaruje se vlačna sila u traci, a vertikalna komponenta te sile koristi se za tlačenje paketa limova. Kod ovog koncepta stezanje paketa limova vrši se samo sa gornje strane paketa, dok je s donje strane oslonjen na profilirane vodilice koje odgovaraju presjeku paketa. Za mjerenje unosa sile u vijcima može se upotrijebiti mjerni pretvornik sile u obliku podložne pločice koja se podmetne pod glavu vijka, međutim, pouzdanija metoda bila bi mjerenje sile u vijku pomoću ultrazvučnog mjerača.



Slika 36. Treći koncept

7.3.4. *Koncept 4*

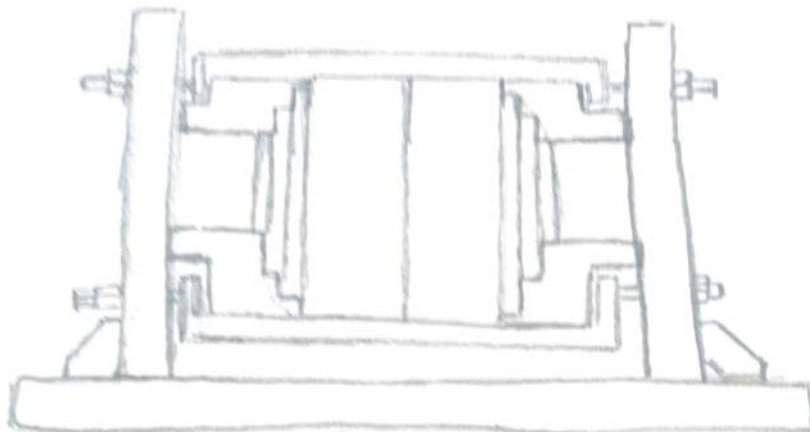
Koncept na slici 37 prikazan je u tlocrtu. U suštini se ne razlikuje bitno od prethodnog. Razlika je jedino u tome što je kod ovog koncepta omogućeno pritezanje paketa limova i s gornje i s donje strane



Slika 37. Četvrti koncept

7.3.5. Koncept 5

Ispitno postolje prikazano na slici 38 temelji se na ostvarenju kontaktnog tlaka sustavom vijak – stezna prečka. Rupa u steznoj ploči je prolazna, a u prečki s navojem. Između stezne ploče i prečke postoji zazor, a između profilne vodilice i stezne ploče ne postoji. Pritezanjem vijka u steznu ploču se unosi moment savijanja i ostvaruje se tlačna sila između stezne ploče i profilne vodilice koja se onda prenosi dalje na limove.

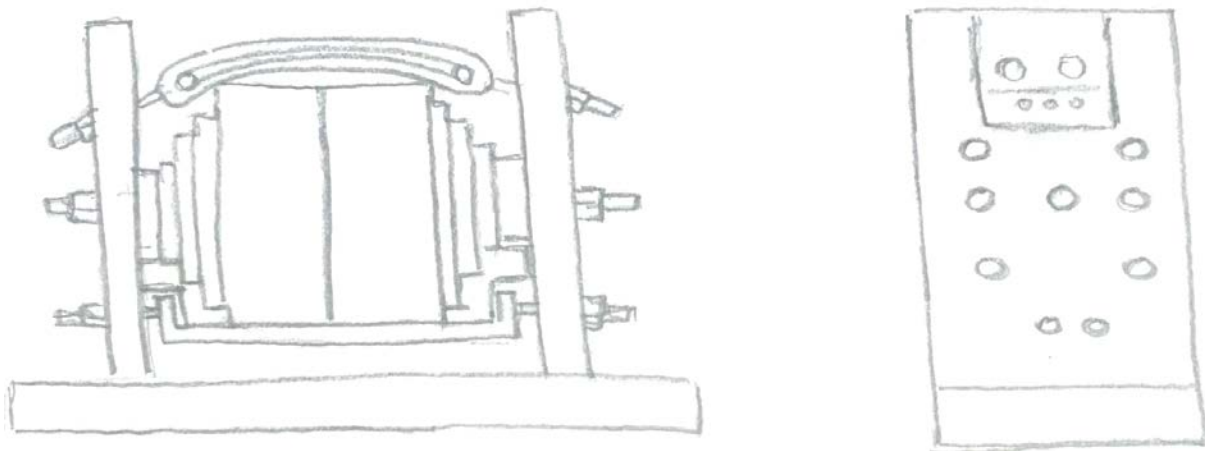


Slika 38. Peti koncept

7.3.6. Koncept 6

Ispitno postolje prikazano na slici 39 omogućuje ispitivanje utjecaja konfiguracije vijaka koji prolaze kroz stezne ploče, od kojih jedan može a i ne mora prolaziti kroz paket limova.

Međutim, ovaj koncept omogućuje i ispitivanje utjecaja stezne trake te stezne prečke čiji se pod sklopovi po potrebi mogu i ukloniti iz cjelokupnog sklopa.



Slika 39. Šesti koncept

7.4. Vrednovanje koncepata

Generirano je zaključno šest koncepata i različitih konstrukcijskih izvedbi uređaja. Nabrojat ćemo neke od glavnih problema određenih koncepata, tj. razloge zašto određeni koncepti nisu izabrani za daljnju razradu.

Prvi koncept vrlo vjerojatno može dati najjednolikiju raspodjelu tlaka među limovima što i je krajnji cilj. Međutim on nije odbran za daljnju razradu jer ima dva velika nedostatka. Prvi je da nije u stanju ispitati kružni presjek limova koji je najčešći u proizvodnji transformatorskih jezgri, a drugi da iziskuje velika materijalna sredstva u vidu nabave elektromotora, izrade bubnja i sustava kolotura, projektiranja pneumatskog sustava i nabave njegovih dijelova. Drugi koncept također je automatski eliminiran jer nije u stanju ispitati kružni presjek limova. Treći, četvrti i peti koncept u suštini omogućavaju da se provede ispitivanje kontaktnog tlaka među limovima kružnog presjeka, međutim, svaki od njih omogućuje ispitivanje samo jedne vrste steznog sustava, a situaciju na stvarnoj transformatorskoj jezgri je takva da zahtjeva istovremeno pritezanje svih triju glavnih elemenata steznog sustava.

Nakon detaljne analize prednosti i nedostataka možemo reći da je za daljnju razradu odabran šesti koncept. Zaključno možemo reći da će se sljedeća poglavlja usredotočiti na detaljnu analizu i razradu izabranog šestog koncepta.

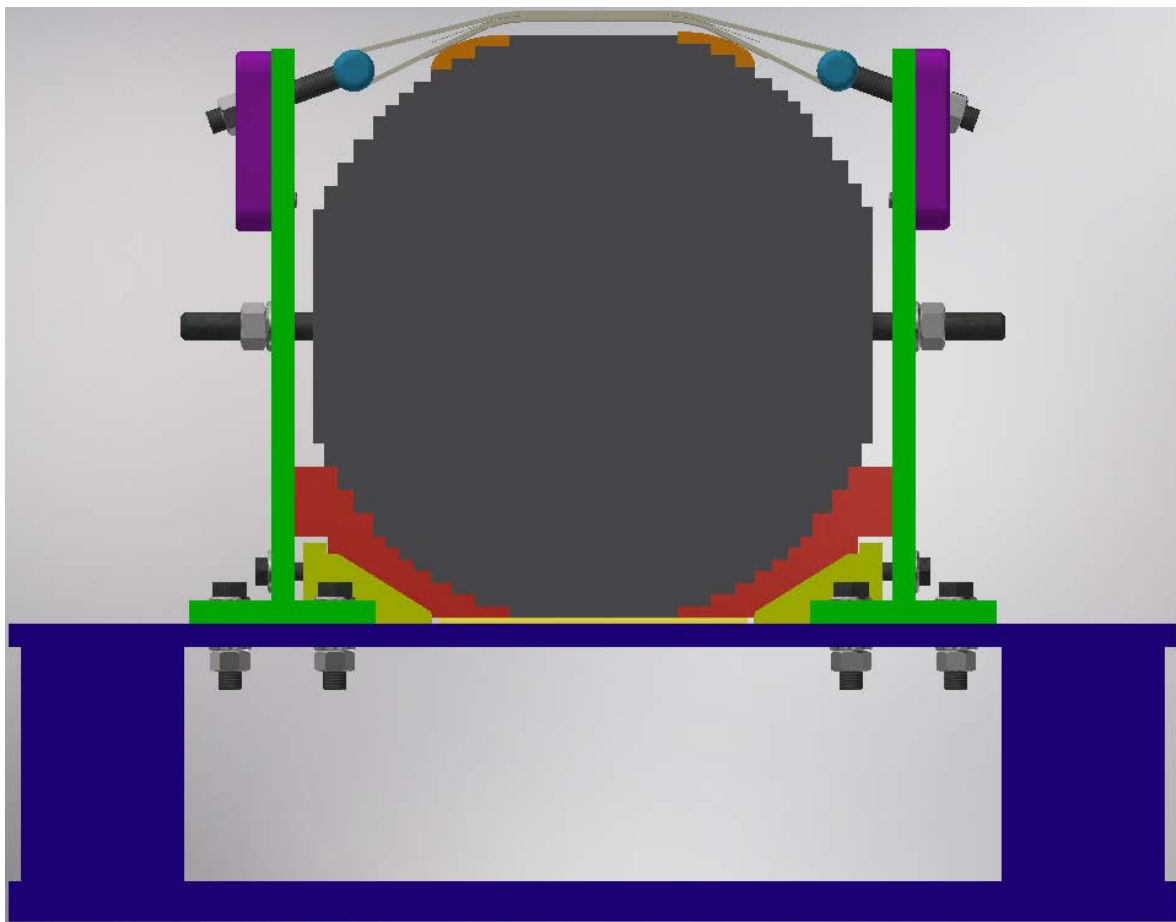
8. ANALIZA ODABRANOG KONCEPTA

8.1. Raspodjela kontaktnog tlaka

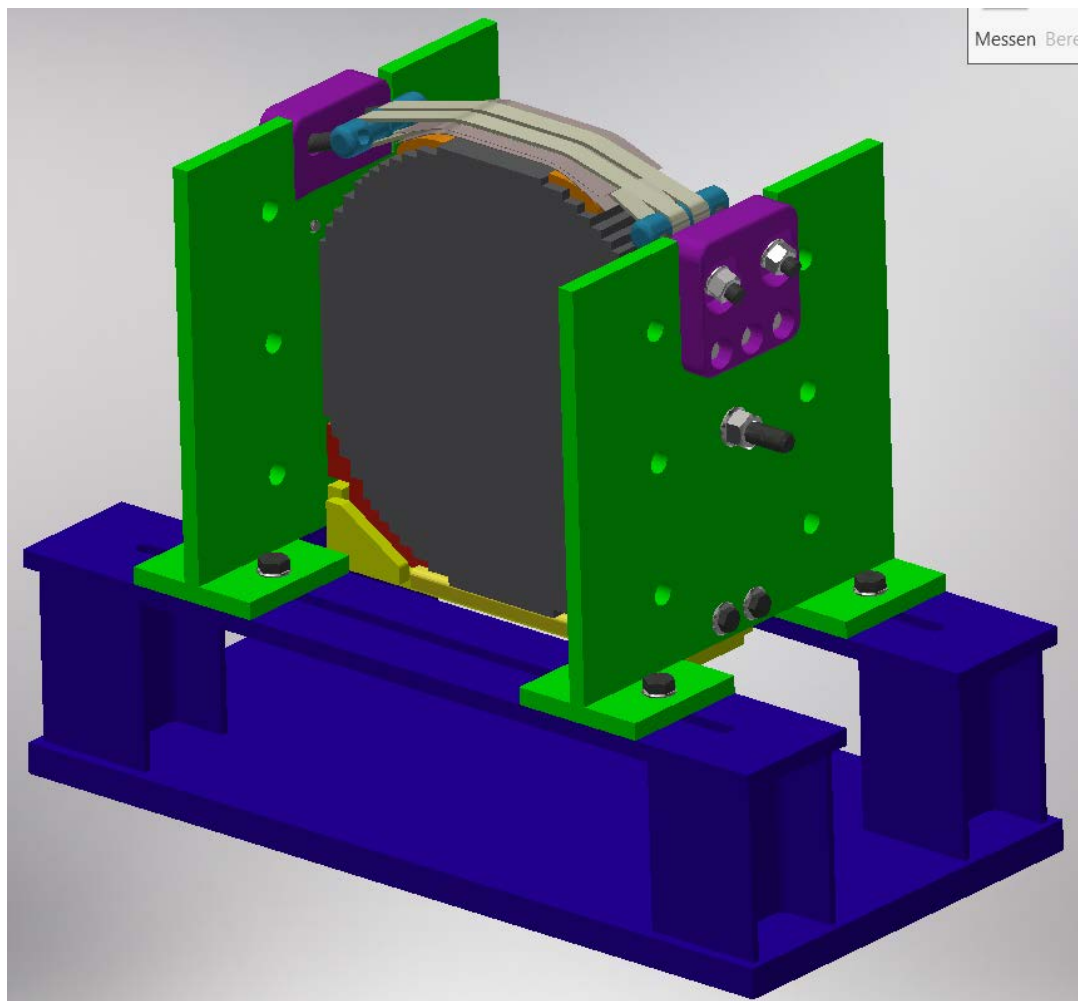
Idealno rješenje bilo bi korištenje matričnog senzora koji je u mogućnosti dati uvid u raspodjelu kontaktnog tlaka u stvarnom vremenu te uzeti u obzir popuštanje vijčanog spoja za razliku od indikatorskog papira koji prikazuje „zamrznutu“ sliku raspodjele kontaktnog tlaka koja je posljedica najvećeg opterećenja koje se pojavljuje prilikom pritezanja.

8.2. Postolja za ispitivanje raspodjele kontaktnog tlaka

Odabrano rješenje ispitnog postolja za razradu i analizu je koncept 6. Konstrukcija postolja napravljena je u programskom paketu Autodesk Inventor, a konačni izgled postolja koji omogućuje ispitivanje svih triju steznih mehanizama istovremena prikazan je na slikama 40 i 41.



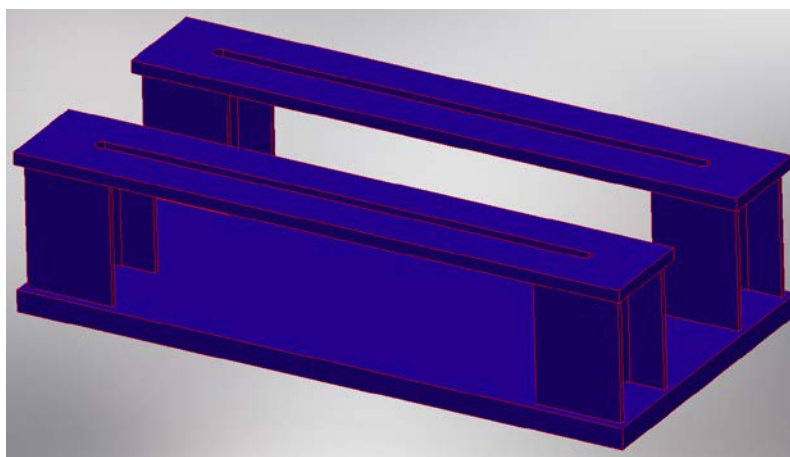
Slika 40. Odabrani razrađeni koncept



Slika 41. Prostorni prikaz razrađenog koncepta

8.2.1. Potporna konstrukcija

Potporna konstrukcija prikazana na slici 42 izrađena je zavarivanjem temeljne ploče, četiriju standardnih HEA 140 profila te dviju ploča s utorom za promjenu pozicije steznika.

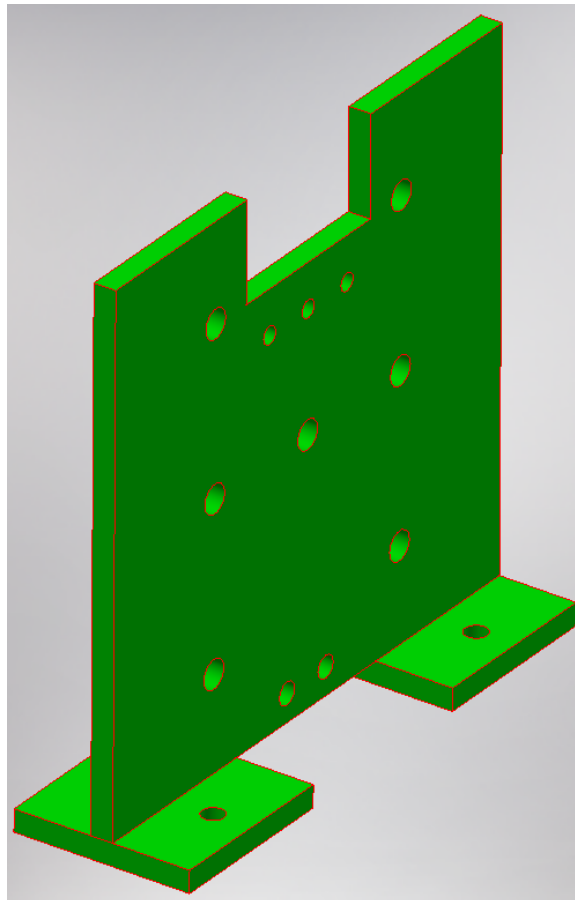


Slika 42. Prostorni prikaz razrađenog koncepta

Visina standardnih HEA profila, tj. visina potporne konstrukcije određena je na način da omogući nesmetano uklanjanje elemenata za ispitivanje stezanjem pomoću steznih prečki za potrebe ispitivanja koje ne uključuje navedene elemente.

8.2.2. Steznici

S potpornom konstrukcijom vijčano su spojena dva steznika izrađena zavarivanjem stezne ploče i dviju temeljnih pločica. Zavareni spoj steznika prikazan je na slici 43.



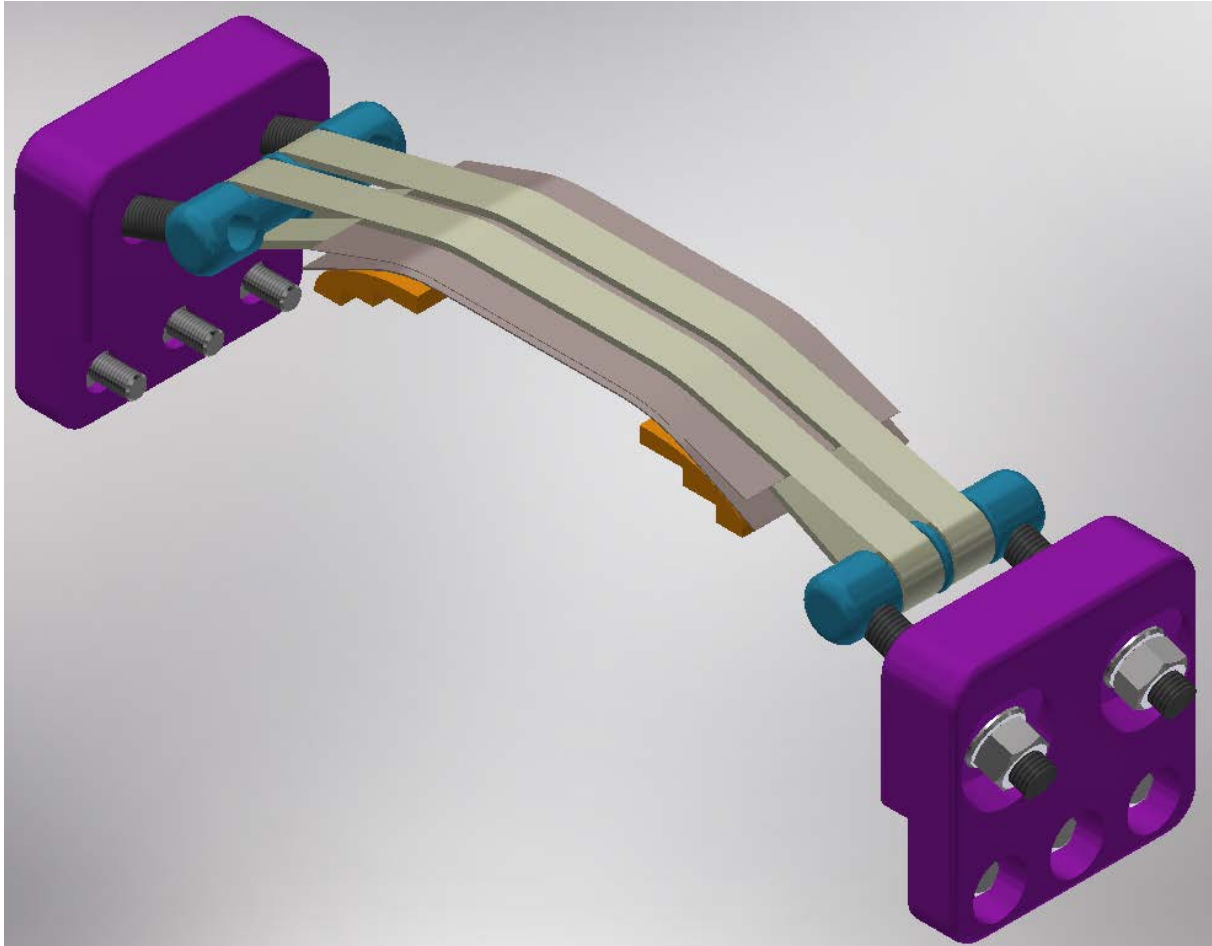
Slika 43. Prostorni prikaz steznika

Na steznoj ploči nalazi se konfiguracija prolaznih rupa za vijke koji omogućuje različite načine stezanja limova upotrebom svornih vijaka. Osim prolaznih rupa za stezanje na steznoj ploči nalaze se i tri rupe koje služe za pozicioniranje elementa koji služi za povezivanje stezne trake sa steznikom te dvije rupe za povezivanje stezne prečke sa steznikom.

8.2.3. Mehanizam za stezanje pomoću steznih traka

Mehanizam stezanja limova uz pomoć steznih traka prikazan je na slici 44. Sila se u sustav unosi pritezanjem matice. U elementu za povezivanje stezne trake sa steznikom nalazi

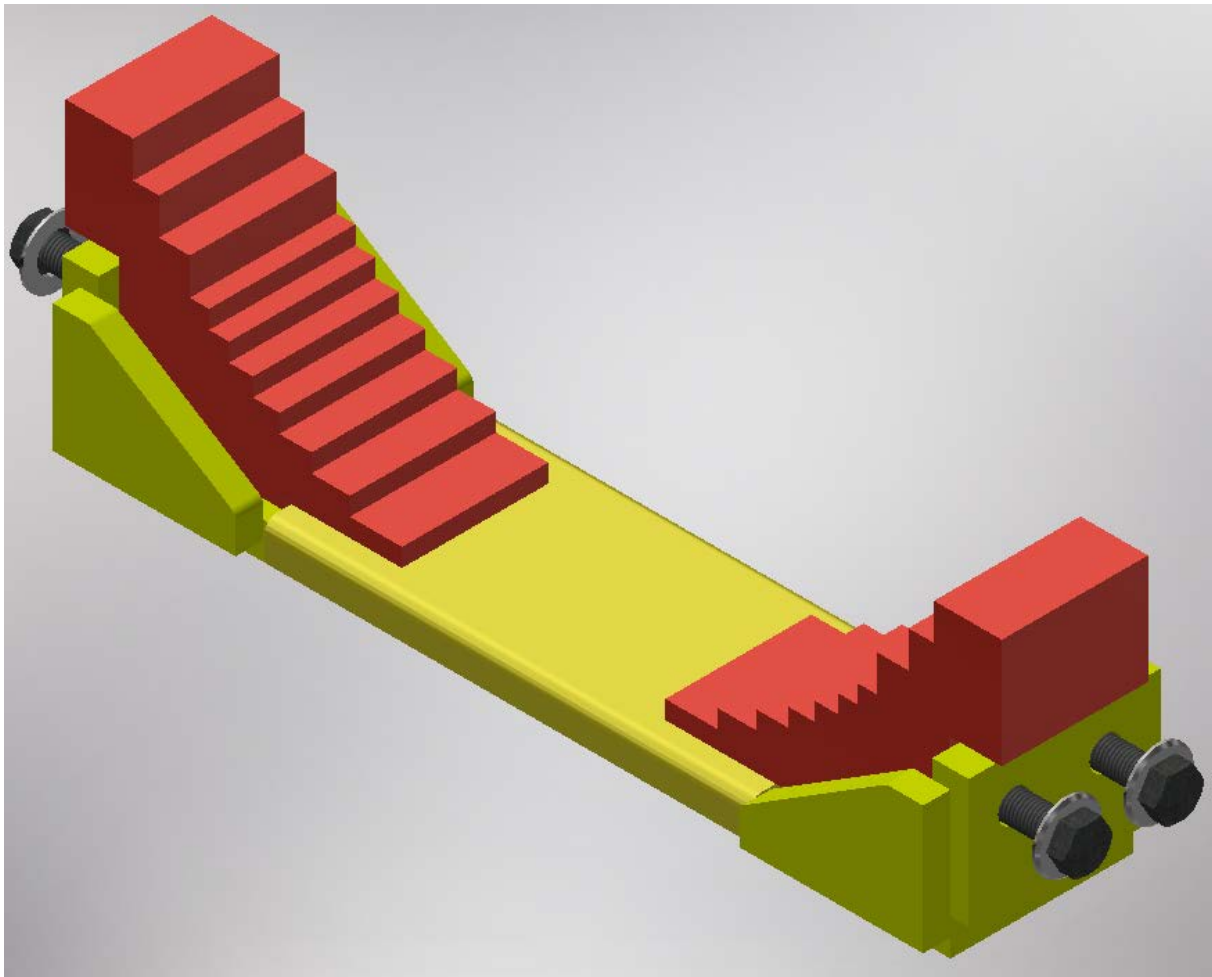
se prolazna rupa, a u natezaču stezne trake rupa s navojem zbog čega prilikom pritezanja matice dolazi do pomaka natezača stezne trake prema stezniku. Kao posljedica toga, stezna traka koja je omotana oko natezača opterećena je na vlak. Između stezne trake i paketa limova nalaze se vodilice stezne trake koje omogućuju ujednačeniju raspodjelu sile na paket limova.



Slika 44. Prostorni prikaz elemenata za stezanje pomoću steznih traka

8.2.4. *Mehanizam za stezanje pomoću steznih prečki*

Mehanizam stezanja limova uz pomoć steznih traka prikazan je na slici 45. Sila se u sustav unosi pritezanjem vijka. U stezniku se nalazi prolazna a u stražnjoj ploči stezne prečke navojna rupa. Budući da između stražnje ploče stezne prečke i steznika postoji zazor, a između steznika i profilne vodilice ne, sila se prenosi preko steznika na profilnu vodilicu koja onda tlači paket limova.



Slika 45. Prostorni prikaz elemenata za stezanje pomoću steznih prečki

8.2.5. Varijabilnost ispitnog postolja

Konstruktivsko rješenje ispitnog postolja treba biti u mogućnosti ispitati pakete limova različitih dimenzija te različite načine stezanja koji su prikazani u prethodnim poglavljima. Ispitivanje paketa limova različitih dimenzija ostvareno je rješenjem potporne konstrukcije koja omogućuje bočno pomicanje steznika. Ispitivanje različitih načina stezanja ostvareno je sklapanjem ispitnog postolja upotrebom rastavljivih, tj. vijčanih spojeva što omogućuje jednostavnu izmjenu steznih elemenata. Ovi zahtjevi postavljeni su na ispitno postolje s ciljem veće varijabilnosti mogućih eksperimenata.

9. ZAKLJUČAK

Jedan od najvećih izazova koji se stavljaju pred proizvođača u serijskoj proizvodnji transformatora, uz smanjenje troškova proizvodnje, je i poboljšanje kontrole i kvalitete procesa proizvodnje. Jedan od načina za postizanje ciljanog poboljšanja je i poznavanje raspodjele kontaktnog tlaka među limovima jezgre.

U radu je prezentirano konstrukcijsko rješenje ispitnog postolja na kojem je moguće ispitati različite sustave koji se koriste za stezanje jezgre transformatora. Svrha steznog sustava je osigurati kontaktni tlak među limovima jezgre. Kontaktni tlak, odnosno kompaktnost limova jezgre, osigurava se pomoću svornih vijaka i/ili steznih traka (bandaža) i/ili steznih prečki. Najveći izazov prilikom konstruiranja ispitnog postolja predstavljala je ponovljivost mjerenja. Stoga se posebna pozornost morala obratiti na mjerenje unesene sile. Konstruiranju ispitnog postolja prethodila je faza koncipiranja kako bi se prikazala različita rješenja za pojedine komponente ispitnog postolja. Prilikom uspoređivanja koncepata i odabira pojedinih komponenata bilo je potrebno manevrirati između dvaju međusobno suprotstavljenih kriterija, cijene i visoke kvalitete mjerenja. Odabir određenih konstrukcijskih rješenja usklađen je sa standardnim steznim elementima koji se koriste u tvrtki Končar Energetski Transformatori d.o.o., a slijedeći korak je provođenje proračuna određenih komponenti ispitnog postolja kako bi se sa sigurnošću moglo reći da će izdržati opterećenja koja se javljaju tijekom ispitivanja.

Kao nastavak ovog diplomskog rada predlaže se izrada ispitnog postolja, kao i izvođenje ispitivanja raspodjele kontaktnog tlaka. Uz ispitivanje raspodjele kontaktnog tlaka bilo bi potrebno pratiti i iznos sile u vijcima. U konačnici, sklop limova bilo bi korisno analizirati i metodom konačnih elemenata te usporediti vrijednosti simulacije s dobivenim ispitnim vrijednostima.

LITERATURA

- [1] Interni dokumenti tvrtke Končar Enregetski transformatori d.o.o.
- [2] Filip Surjak, Određivanje momenta pritezanja kompozitnog svornog vijka, Diplomski rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje, 2017.
- [3] Dolenc A., Transformatori I i II, 1987
- [4] Walker, J. H. et al: Pressing and clamping laminated cores, The institution of electrical engineers, 1964.
- [5] Wen, C. –Y. et al: Experimental study of clamping effect on the performances of a single proton exchange membrane fuel cell and a 10-cell stack, Journal of Power Sources, 2009.
- [6] Alizadeh, E. et al: Investigation of contact pressure distribution over the active area of PEM fuel cell stack, International journal of hydrogen energy, 2016
- [7] Bates, A. et al: Simulation and experimental analysis of the clamping pressure distribution in PEM fuel cell stack, International journal of hydrogen energy, 2013
- [8] Montagnini, R. et al: Experimental evaluation of the clamping pressure distribution in a PEM fuel cell using matrix-based piezoresistive thin-film sensors, XIX IMEKO World Congress Fundamental and Applied Metrology, 2009
- [9] <https://www.tekscan.com/resources/whitepaper/comparison-interface-pressure-measurement-options> (zadnji put pristupljeno: 18.12.2019.)
- [10] <https://www.flickr.com/photos/32763740@N06/7871085734> (zadnji put pristupljeno: 10.1.2020)
- [11] USM-3 Ultrasonic bolt meter operation and reference manual ver 2.0, Norbar USA Inc., 2007

PRILOZI

- I. CD-R disc
- II. Tehnička dokumentacija